



TITLE:

# 地震津波防災に関する研究( Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

安野, 浩一郎

---

CITATION:

安野, 浩一郎. 地震津波防災に関する研究. 京都大学, 2014, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2014-03-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18236>

RIGHT:

# 地震津波防災に関する研究

平成 26 年 3 月

安野 浩一郎



# 目 次

## 第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	6
参考文献	8

## 第2章 津波による浸水被害の評価

2.1 伝播・遡上および浸水解析手法の概要	10
2.2 検討条件	13
2.2.1 対象地点・想定津波	13
2.2.2 検討対象地点の特性	15
2.2.3 検討ケース	17
2.3 津波浸水被害の評価 ～気仙沼大川北部を対象として～	17
2.3.1 浸水領域（L1 地震津波, L2 地震津波）	17
2.3.2 時刻歴特性	19
2.4 結論	21
参考文献	22

## 第3章 船舶漂流による被害の評価

3.1 漂流物の挙動解析手法の概要	23
3.2 解析手法の妥当性の確認	25
3.2.1 水理模型実験の概要	25
3.2.2 抗力実験結果	29
3.2.3 実験結果の再現計算	33
3.3 船舶漂流による被害の評価 ～気仙沼大川北部を対象として～	42
3.3.1 対象船舶の設定	42
3.3.2 船舶漂流による被害評価（L1 地震津波, L2 地震津波）	43
3.4 結論	51
参考文献	52

## 第4章 人的被害の評価

4.1 人の避難行動解析手法の概要	53
4.1.1 避難行動ポテンシャルモデル	53
4.1.2 避難速度・可否限界条件	54
4.1.3 地震動での道路閉塞による影響	57
4.2 人的被害の評価 ～気仙沼大川北部を対象として～	59
4.2.1 避難モデルの設定	59
4.2.2 人的被害の評価 (L1 地震津波, L2 地震津波)	61
4.2.3 街路閉塞による避難成功率への影響	67
4.3 結論	70
参考文献	71

## 第5章 津波防波堤の倒壊被害評価

5.1 津波防波堤の大変形破壊解析手法の概要	72
5.1.1 津波防波堤のモデル手法	72
5.1.2 パラメータ値の高度化	75
5.2 解析手法の妥当性の確認	78
5.2.1 水理模型実験の概要	78
5.2.2 水理模型実験の再現計算結果	79
5.3 津波防波堤の倒壊被害評価 ～気仙沼大川北部を対象として～	88
5.3.1 津波防波堤の仮定条件概要	88
5.3.2 津波防波堤の被害評価 (L1 地震津波, L2 地震津波)	90
5.4 結論	94
参考文献	95

## 第6章 地震津波に対する減災の評価

6.1 減災評価法の概要	96
6.1.1 減災の概要	96
6.1.2 減災へのプロセスにおける課題とその解決策	99
6.1.3 津波被害に対する減災へのアプローチ	100
6.2 減災のための対策法とその評価 ～気仙沼大川北部を対象として～	101
6.2.1 目標レベルの設定 ～あるべき姿～	101
6.2.2 現状における被害リスクの整理 ～ありのままの姿～	101
6.2.3 実施すべき対策の整理 ～やるべきこと～	102
6.2.4 津波防波堤設置による減災効果の評価	104
6.2.5 避難所増設による減災効果の評価	116

6.3 結論 .....	120
参考文献 .....	121
第 7 章 結論 .....	122
謝 辞 .....	126



# 第1章 序論

## 1.1 研究の背景

臨海部に人口と資産が集中する我が国は、津波・高潮による被害を受けやすい地形条件にあり、今までに多くの人的被害を伴う災害を経験している。表-1.1は1960年以降の主要な津波による被害を示している。中でも、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震による津波により我が国が被った被害ははかりしれない。政府の中央防災会議が試算した被害想定によると、近い将来発生が懸念されている東海地震や東南海・南海地震に関しても、津波により多くの被害が生じることが指摘されている（表-1.2：活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧（2011）から）。津波による被害は、直接的な浸水被害に加え、多くの人的資産の被害や港湾構造物などのハード施設の損壊、漂流物による被害など多岐に渡る。3月11日の地震津波被害からの復興に加え、今後発生が想定される日本の沿岸域の巨大津波に備えることは緊急の課題となっている。

津波への備えに対しては、防波堤・水門などのハード施設の整備を推し進めることが重要であるが、少子高齢化や、人口の減少による国家財政の逼迫、必要となる整備区間が数万キロに及ぶ我が国の海岸線を防護しなければならない等を考えると、ハードのみに頼ることは現実的に困難である。さらには、3月11日の震災で、図-1.1に示す釜石湾口防波堤の倒壊に代表されるように、自然の脅威に対してはハード施設で完全に防護することは、たとえ最先端の技術や人類の英知をもってしても及ばないものであると我々は思い知らされた。そのため、ハード面での対策を推し進める一方で、警報・監視網の強化、ハザードマップの整備による津波に対する危険地域の住民への周知、それらに基づく避難計画の策定などといった、いわゆるソフト面での対策が一層重要な位置付けを占める。

ソフト面の対策を充実させるには、現実には即した津波による被害を予測する必要がある。津波による被害は冒頭で述べた通り多岐に渡るため、現実には即した被害予測を行うためには種々に渡る内容を網羅した検討が重要である。それらにおいては、以下の4つの項目が津波被害を予測して想定・把握する上で最重要であると考えられる。

1. 津波の伝播による浸水被害
2. 漂流物による乗り上げ・突被害（船舶漂流被害）
3. 避難を考慮した浸水に伴う人的被害
4. 防波堤・防潮堤などの防災施設の破壊被害と破壊に伴う浸水被害の増幅化

これまで津波防災に関して個々の被害項目に精通した専門技術者は多く存在するものの、現実的な津波被害を論ずる上で必要不可欠な被害全般について熟知した専門技術者は殆ど見当たらない。津波防災においては、被害全般について熟知した専門技術者の育成も今後おおいに必要である。海岸・港湾系の土木技術者は、厳しい自然条件の中で防波堤などの防災構造物が壊れないように作り上げることを主目的とした研究に偏っていたように思われる。東北地方太平洋沖地震による津波で見られたように、想定を超えた外力が作用した時に、“頼りとする防災構造物”がなくなるとどうなるかといった現実直面した時に関する研究事例があまりにも少なかったように思われる。今後は、防ぐことを軸とする防災ではなく、さまざまな脆弱性を考慮した上で人命を守ることを主軸とした対策が重要視されつつあるものの、対策を決定するために必要な技術開発研究はほとんどなされていないのが現状である。

表-1.1 津波による被害例（1960年以降）

名 称 ・ 年 号	外郭施設の被害	浸水被害	漂流物被害	人的被害
新潟地震津波	1964年		倉庫内保管商品の商品価値損失 石油タンクから危険物の流出・原木の流出	26
十勝沖地震津波	1968年		住居 船舶の流出	52
日海中部地震津波	1983年	導流堤、護岸等の滑動・転倒	漁港設・住居 原木・漁船の流出	104
北海道南西沖地震津波	1993年	防波堤、護岸等の滑動・転倒	フェリーターミナル・漁港設・住居 自動車・漁船・家屋残骸物の流出	230
北海道東方沖地震津波	1994年			10
十勝沖地震津波	2003年		フェリーターミナル・荷役機械等 コンテナ・漁船の流出	2
東北太平洋沖地震津波	2011年	防波堤、護岸等の滑動・転倒	東北地方沿岸全域 コンテナ・漁船の流出	20000以上

表-1.2 東海・南海・東南海地震の発生確率<sup>1)</sup>

地震	長期評価で予想した地震規模 (マグニチュード)		30年以内の 地震発生確率
東海地震	8 程度		87% (参考値)
東南海地震	8.1 前後	同時	70%程度
南海地震	8.4 前後	8.5 前後	60%程度もしくはそれ以上







一方、震災以降今回の経験を受けて防災対策に関しての考え方に大きな変化が見られている。これまでの津波災害対策においては、概ね 100 年周期程度で来襲すると想定される地震津波に対して、ハード施設による防災対策が主たるアプローチ方法であり、それ以上の再現周期に関する知見の蓄積や行動は取られていない。しかし、今回のような深刻な被害をもたらす自然災害の再現周期がきわめて長い場合、ハード施設を設置するだけのアプローチでは不十分であり、被災の正確な実態と教訓を次に来るべき巨大災害への備えとするために、きわめて長期にわたる合理的な減災達成の戦略を整理し検討しておく必要性が指摘されつつある。極低頻度の巨大地震がもたらす津波の災禍を将来にわたってどのように軽減していくか、つまり津波減災達成（減災マネジメント<sup>27)</sup>に必要な施策や対策とその展開のプロセスについて、工学、社会科学および経済学の観点から多面的な検討・整理を行っていくことが今後の我々研究者に課せられた命題であると考えられる。以下では、津波被害を予測して想定・把握する上で最重要な 4 項目についての研究状況を概説する。

津波による浸水・船舶漂流・人的、および防災施設の破壊被と破壊に伴う浸水被害の増幅化に関する被害予測手法について、既往の研究成果は次のようにまとめられる。まず津波の伝播による浸水被害については、これまで多くの研究がなされており、線形・非線形長波理論を用いた数値シミュレーションによる検討が主流であり、過去の被害調査や水理模型実験などの検証によりその手法の妥当性が議論されている（例えば、小谷ら（1998）、相田（1998）、Mansinha&Smylie（1971））2011 年 7 月には、東北地方太平洋沖地震津波の被害を鑑みて、津波伝播解析に要求される解析手法についてガイドラインが国土交通省から公開されるなど、実務的にはほぼ解析技術の完成に至っているといえよう（津波浸水シミュレーションの手引き、国土交通省、2011 年 7 月）。

船舶の漂流による被害の予測手法としては、近年、拡張個別要素法や MPS 法を用いた研究が盛んに行われている（例えば、藤井ら（2005）、熊谷ら（2006）、池谷ら（2006）、橋本ら（2009））。熊谷ら（2006）は、コンテナなどを対象に拡張個別要素法（目黒（1988））を用いた研究を進めている。池谷ら（2006）は矩形船舶を対象とした船舶の挙動や衝突力の研究を行っている。後藤ら（2009）は、MPS 法を用いた津波によるコンテナの挙動解析手法の構築を試みている。また、漂流物の衝突力については池谷ら（2006）、水谷ら（2008）の研究事例がある。

これらの研究は、津波の水位変動計算をまず行い、その結果を元に漂流物の挙動計算を解く、もしくは波と漂流物を同時に解く手法である。いずれにせよ、漂流物の挙動は津波水位・流速を外力条件として解くために、漂流物挙動の解析精度だけでなく、波の場の再現精度と重なって挙動の誤差が大きくなりがちとなる。そのため、過去の研究事例でも漂流挙動の不確定性についての議論がなされており、それに関する研究も行われつつある。例えば、水谷ら（1982）や、藤井ら（2007）は、漂流物の挙動の不確定性を拡散係数により確率的に評価する手法を提案し、その妥当性について検証を行っている。

浸水による人的被害の予測手法としては、津波による陸上遡上を再現する浸水シミュレ



ーション解析が一般的に行われるようになるとともに、浸水計算結果を外力条件として津波災害時の人間の避難行動を模擬する避難シミュレーションの研究がなされている。例えば、今村ら（2004）は GIS データからグリッドモデルを構築し、津波の遡上伝播解析結果に対する人の避難行動解析を行っている。また、松藤ら（2003）は GIS データから街路を構築し、ノード・リンクモデルに基づく解析手法を構築している。密集空間での避難行動に関しては、渡辺（2002）の研究事例がある。避難行動における障害要因について焦点を当てた研究としては、佐藤ら（2002）の地震動が引き起こす建物倒壊による移動障害についての検討事例がある。

防波堤などの港湾構造物・防災施設の破壊被害の予測手法としては、陸田ら（2009）による SPH 法を用いた橋脚構造物の弾塑性解析コードの開発や、五十里ら（2011）の改良型粒子法に基づくケーソン防波堤の崩壊解析などの事例がある。谷本ら（1996）は直立防波堤の滑動破壊に関する簡易モデル化方法を提案し、下迫ら（1998）は、その簡易モデルにモンテカルロシミュレーションを組み込んだ防波堤の期待滑動量についての研究を行い、また水理模型実験の再現計算により手法の妥当性を確認している。上述したように、津波浸水遡上解析手法以外については、まだ研究途上であり、実用化までの段階に到達していないと言えよう。

また、長期にわたる合理的な減災達成の戦略を整理し検討するためには、（１）災害に対する現状の把握（ありのままの姿）、（２）現在の取組による効果、について詳細に予測・評価する解析技術が必要となってくる。特に、現状のライフライン、防護施設の健全性や想定を越えた外力による防災効果の低減などを考慮された（２）の評価はこれまで殆ど研究がなされた例がない。

以上の研究動向を踏まえて、本研究においては、津波による被害全般について現実的な予測が可能な総合ツールの構築を行うことを目的とする。手法の構築においては、津波の遡上浸水被害、船舶漂流被害、人的被害、防波堤の破壊被害の主として４つの予測法を開発した上で総合予測手法を構築する。さらに、検討対象地点として宮城県気仙沼北部を例に挙げ、当該地点の現状で発生すると予測される津波被害全体の把握、現状を踏まえた対策方法の提案、そして、その対策による定量的な効果の検証を行い、減災を果たすための有力な活用方法、すなわち減災マネジメントシステムを行う上での重要な総合ツールとしての適用性について言及する。



## 1.2 研究の目的

本研究の目的は、津波によって生じると想定される重要な 4 つの被害項目について、現実的な予測が可能な総合ツールの構築を行うことを目的とする。各章の構成を以下に示す。

第 1 章では、研究の背景と目的を述べている。

第 2 章では、津波の伝播による浸水被害について述べる。津波の浸水計算については妥当性が検証されている既往の計算手法を用いた津波伝播計算を行い、気仙沼地点の津波浸水高や流速、被害領域などについて詳細な考察を行う。この章で得られた水位・流速等のデータを第 3 章以降の検討に活用する。

第 3 章では、漂流物による被害の予測について述べる。漂流物の被害予測は、個別要素法により挙動・衝突・座礁を再現可能な方法をベースとする手法とし、計算負荷が小さく漂流物の浮体特性を考慮可能な剛体モデルを用いる計算コードを新たに構築し、この手法の妥当性を確認する。構築した手法の妥当性検証は、自動車とコンテナを対象とした水理模型実験結果との比較により行う。次に、第 2 章で得た水位・流速データを用いて気仙沼地点における漂流物による被害予測を検討する。検討においては、被害が発生する地点等について検討する。また、漂流拡散による挙動の不確定性を導入した衝突力の発生確率、衝突頻度などの新たな確率的衝突被害の評価法についての提案を行う。

第 4 章では、浸水に伴う人的被害の予測について述べる。人的被害の予測手法には松藤ら（2003）のノード・リンクモデルを用いた方法を採用するとともに、被害予測における人の避難行動特性について新たな知見を加える。新たな研究としては、道路渋滞を考慮した車両移動を避難手段とした場合の被害想定を導入する。従来技術である徒歩による避難に加え、避難車両の台数の違いによる人的被害へ与える影響などに関する検討を行う。さらには、地震による建物の倒壊が引き起こす避難路の閉鎖状態を考慮する方法を導入する。閉塞状態の再現手法としては、阪神淡路大震災における倒壊家屋の瓦礫幅発生分布を参考に簡易的な街路閉塞モデルを新たに構築する。そして、気仙沼地点における街路閉塞による人的被害への影響についての検討を加える。

第 5 章では、防波堤などの港湾構造物・防災施設の破壊発生・破壊状況の評価手法について述べる。本研究における対象は、津波を低減する構造物として大きな役割を担う第一線沖合防波堤とし、これまでの研究成果である滑動破壊だけでなく、防波堤の転倒破壊を含む大変形破壊に関する検討を行う。構築する手法は、捨石マウンドをより現実的に即したモデル化が図れる雨森ら（2005）をベースにし、ケーソンを剛体連結モデルで再現する手法を新たに構築する。さらに、宮田ら（2010）の実験結果に対する再現計算を通じて、防波堤の大変形破壊に関する計算手法の妥当性を検証する。そして、気仙沼地点に新たな防災施設を提案し、地震津波毎の外力作用時の変形状況を把握する。

第 6 章では、第 2 章から第 5 章で行った気仙沼地点を対象に行った検討結果をまとめて減災対策評価法についての提案を述べる。気仙沼地点を対象とした具体的な減災対策評価

においては、まず耐津波構造物の減災効果を考慮した浸水被害、船舶漂流被害、人的被害について詳細に述べ、解析結果から得られる被害発生に対する現状を整理する。次に、人的被害を防止するための適切な避難所の配置計画や、船舶漂流を防ぐための係留方法の提案などについて検討を行い、減災を果たすための効果的な方策について言及を行う（減災マネジメントの一環）。

第7章では、本論文で得られた知見を結論としてまとめるとともに、今後の展望などについて述べる。



## 参考文献

- [1] 地震調査研究推進本部：活断層及び海溝型地震の長期評価結果一覧(2011年1月時点), 14p., 2011.
- [2] 独立行政法人 港湾空港技術研究所：東北地方太平洋沖地震津波による釜石港津波防波堤の被災要因の検討, 8p., <http://www.pari.go.jp/info/tohoku-eq/20110401.html>.
- [3] 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫：GIS を利用した津波遡上計算と被害推定, 第 45 回海岸工学論文集, pp.356-360, 1998.
- [4] Mansinha, L. and D.E.Smylie : The displacement fields of inclined faults, *Seismol. Soc. Amer.*, Vol.61, pp.1433-1440, 1971.
- [5] 国土交通省：津波浸水シミュレーションの手引き, 2011年7月, 77p., 2011.  
[http://www.jice.or.jp/sinsai/sinsai\\_detail.php?id=1105](http://www.jice.or.jp/sinsai/sinsai_detail.php?id=1105)
- [6] 熊谷兼太郎, 小田勝也, 藤井直樹：津波によるコンテナの漂流挙動シミュレーションモデルの適用性, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.241-245, 2006.
- [7] 池谷毅, 稲垣聡, 朝倉良介, 福山貴子, 藤井直樹, 大森政則, 武田智吉, 柳沢賢：津波による漂流物の衝突力の実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.276-280, 2006.
- [8] 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 朝倉良介, 入谷剛, 柳沢賢：津波による漂流物の移動に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.127-132, 2005.
- [9] 目黒公郎, 伯野元彦：粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究所彙報, vol.63, 東京大学地震研究所, pp.409-468, 1988.
- [10] 後藤仁志, 五十里洋行, 殿最浩司, 柴田卓詞, 原田知弥, 溝江敦基：粒子法によるエプロン上のコンテナ漂流挙動追跡シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.261-265, 2009.
- [11] 水谷法美, 廉慶善, 宇佐美敦浩, 中村友昭, 白石和睦：陸上津波によるコンテナの漂流と漂流衝突力に関する研究, 第 20 回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, 6p., 2008.
- [12] 後藤智明, 佐々木順次, 首藤伸夫：津波による木材の挙動, 海岸工学論文集, 第 29 巻, pp.491-495, 1982.
- [13] 藤井直樹, 福山貴子, 稲垣聡, 池谷毅, 柳沢賢, 大森政則：津波による漂流物挙動の変動性に関する実験と評価方法の提案, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp.241-245, 2007.
- [14] 橋本貴之, 越村俊一, 小林英一：津波による大型船舶の漂流挙動解析ーインドネシア・バンダアチェにおける事例ー, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.316-320, 2009.
- [15] 今村文彦, 藤原誠, 進藤一弥, 市村強：臨海都市域に來襲する津波の統合シミュレーション開発, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.291-295, 2004.
- [16] 須賀堯三, 上阪恒雄, 吉田高樹, 浜口憲一郎, 陳志軒：水害時の安全避難行動(水中

- 歩行)に関する検討, 水工学論文集, 第 39 卷, pp.879-882, 1995.
- [17] 松藤賢治: 火災・浸水を考慮に入れた避難シミュレーションソフトウェアの開発, 山口大学修士論文, 121p, 2003.
- [18] 佐藤広章, 村上仁士, 島田富美男, 上月康則, 倉田健吾, 大谷寛: 地震動による家屋倒壊を考慮した津波来襲時における避難に関する一考察, 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.311-315, 2002.
- [19] 渡辺眞知子: バーチャルリアリティ空間を利用した市街地の総合環境評価システム—地下街防災の安全性評価支援システム—大林組技術研究所報, No.64, 6p, 2002.
- [20] 陸田秀美, 湯藤康治, 土井康明: 粒子法による流体弾塑性解析法の開発と衝撃圧問題への適用, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), pp.36-40, 2009.
- [21] 五十里洋行, 後藤仁志, 吉年英文: ケーソン式防波堤の大変形解析のための改良型 MPS 法の基礎的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 58 卷, pp.731-735, 2011.
- [22] 下迫健一郎, 高橋重雄: 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾空港技術研究所報告, 第 37 卷, 第 3 号, 32p, 1998.
- [23] 谷本勝利, 吉川浩司, 中村廣昭: 混成堤直立部の滑動時の流体抵抗力と滑動量算定モデル, 海岸工学論文集, 第 43 卷, pp.846-850, 1996.
- [24] 今瀬達也, 前田健一, 三宅達夫, 鶴ヶ崎和博, 澤田豊, 角田紘子: 津波襲来時における海底地盤の変形に起因した防波堤の不安定化, 第 22 回中部地盤工学シンポジウム, 6p, 2010.
- [25] 雨森洋司, 高山知司, 金泰民, 永江大成: 波浪外力に対する混成防波堤の動的挙動に関する数値計算, 京都大学防災研究所年報, 第 48 号 B, 9p, 平成 17 年 4 月.
- [26] 宮田正史, 安野浩一朗, 吉田誠, 関本恒浩, 大久保陽介: ケーソン式防波堤の大変形破壊に伴う作用波力に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 56 卷, pp.241-245, 2010.
- [27] 土木学会: 津波推計・減災検討委員会報告書, 115p. , 平成 24 年 6 月.





## 第2章 津波による浸水被害の評価

本章では、津波による被害のうち、浸水被害を扱う。気仙沼大川北部地点を対象とし、レベル1およびレベル2の地震津波に対する伝播・遡上と浸水被害特性について詳細な検討を行う。本章で用いる数値モデルは従来から用いられているもので、数値モデル自体の新規性はないが、総合被害評価においては外力の初期設定が必要であり、気仙沼大川北部地点での具体的な浸水範囲を求めるために重要となる。

### 2.1 伝播・遡上および浸水解析手法の概要

#### (1) 津波伝播モデル

地震による津波の伝播解析には、線形・非線形長波理論に基づく手法を用いる。過去の地震津波の発生状況を調べると、断層の水平スケール(L)は200 kmから300 kmであるのに対して、水深はせいぜい4000 mから5000 m（鉛直スケール）であり極めて小さい。このような場合、通常地震であれば海底の地盤変動はそのまま海水の表面変動になるとみなせ、断層モデルによる海底変動量をそのまま津波の初期水位として仮定することができる。すなわち、流体の圧縮性と変位の遅れを無視できる。このような背景から本検討では、断層モデルに従った地盤の変形量を初期水位としてその後の津波伝播を解くこととした。断層モデルおよび地盤変位の考え方については2.2.1節にて記載する。

一般に、波動を再現しようとする場合、その物理モデルにおいて非線形性と波数分散性が重要なパラメータとなる。非線形性は波高と水深との比に関連し、水深が浅くなるにつれ影響を増して、波高の増幅や波形の前傾化などの現象が生じる。一方、波数分散性は、その波長に対する水深の比に関係し、波長によってその波速が変化するという性質を持つ。津波のような長い周期の波に対しては分散性が小さく長波理論が適用できる。

以上から、津波を再現する理論として、目安として50 m以上の深海では線形長波理論、それ以下の浅海では非線形長波理論を用いることで、津波の再現が十分可能である。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (2-1-1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M+N}}{D^{7/3}} = 0 \quad (2-1-2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N \sqrt{M+N}}{D^{7/3}} = 0 \quad (2-1-3)$$

ここで、 $\eta$  は水位、 $M$ 、 $N$  は $x$ 、 $y$ 方向の線流量、 $\xi$  海底鉛直変位分、 $D$  は全水深であり

$h+\eta$  で定義される.  $n$  はマンニングの粗度係数をそれぞれ示している.

式(2-1-2), および式(2-1-3)は, 運動量の保存式であり, 海底摩擦項も含んでいる. なお, 両式の左辺第2項と第3項が移流項でありこれを消去し, 第4項の圧力項の  $D$  を  $h$  に近似すれば線形長波理論になる.

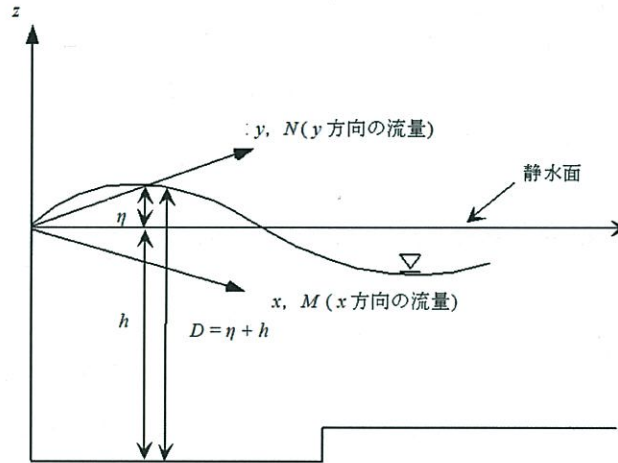


図-2.1 計算座標及び変数の定義

## (2) 差分方法

本研究において採用した差分法は陽解法の1つである Staggered leap-frog 法を用いて, 支配方程式を離散化する. Staggered leap-frog 法では, 水位  $\eta(z)$  に対する線流量  $M, N$  の計算点を空間・時間的に  $1/2$  格子ずらして配置する. 図-2.2 には,  $xy$  2次元空間で見た, 計算点の配置を示したものである. 矢印が流量であり, 点が水位, 水深の地点である. これらは  $dx, dy$  で囲まれた計算メッシュでの平均値となる.

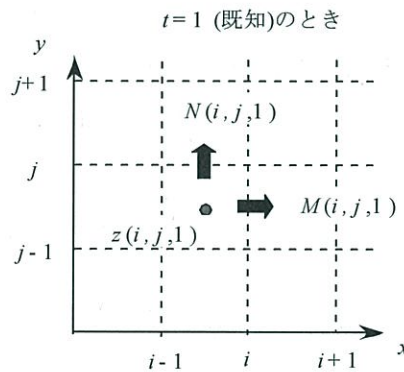


図-2.2 計算点の配置

Staggered leap-frog 法では  $k$  時点での水位,  $k+1/2$  時点での線流量が既知であるので,  $k+1$  時点での水位のみを求めればよいことになる.

### (3) 領域接続

津波の周期は場所によらず一定であるが、水深が浅くなるとまず先端部での伝播速度が遅くなり、後方の成分が追いつくようになるため波長は短くなる。一波長に対する分解能（いくつ格子を含むか）を一定に保つためには、浅い水深の領域ほど細かな格子サイズの計算領域を設定する必要がある。また、沿岸に近づくにつれ、地形も複雑になるために、格子による近似度を上げるためには、細かなサイズを選ばなければならない。以上の理由から、格子間隔の異なる領域を接続して、同時に計算する手法（領域接続法(Two way nesting)）が用いられている。ここでは、大格子領域と小格子領域があり、それぞれ計算された情報をやり取りすることにより、連続的に計算を実施することができる。情報のやり取りに関して原則的な処理は以下ようになる。

- 大格子領域で計算された流量を補間（補外）して小領域に与える。
- 小格子領域で計算された水位を補間（平均化）して大領域に与える。

### (4) 粗度係数の設定

津波の計算における家屋等による大障害群の抵抗則の評価は、小谷ら(1998)の成果に基づく粗度係数の設定方法を用いた。表-2.1 に設定一覧を示す。

表-2.1 設定粗度一覧

区分	設定粗度
高密度居住区 (50～%)	0.080
中密度居住区 (20～50%)	0.060
低密度居住区 (0～20%)	0.040
森林域	0.030
田畑域	0.020
海岸・河川域	0.025

( ) : 家屋等の占有率

### (5) 防波堤などの遮水構造の評価

防波堤などの防災構造物については、計算格子間に質量の持たない標高値を設定することで、津波の越流境界として評価して計算を行う。なお、第 6 章の防波堤の破壊による影響を考慮した津波伝播計算においては、防波堤の破壊に伴う標高変化を評価している。

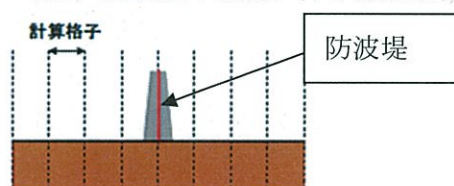


図-2.3 防波堤の評価方法



## 2.2 検討条件

### 2.2.1 対象地点・想定津波

津波による浸水被害の検討地点は気仙沼市大川北部地点とし(写真-2.1 および 図-2.4), 想定津波はレベル 1 相当の地震として連動型宮城県沖地震, レベル 2 相当として東北地方太平洋沖地震津波とする. レベル 1 相当の地震の計算においては宮城県防災会議地震対策専門部会<sup>2)</sup>による断層パラメータを, レベル 2 相当については, 東北大学モデル (Version1.1) を用いる. 断層モデルに対してはアスペリティを考慮しないパターン<sup>2)</sup>を考え, Mansinha & Smylie<sup>3)</sup>の手法に従って静的に海底地盤変位を計算し, これを初期水位として与える. (以降の議論では L1 地震津波, L2 地震津波と記載する).

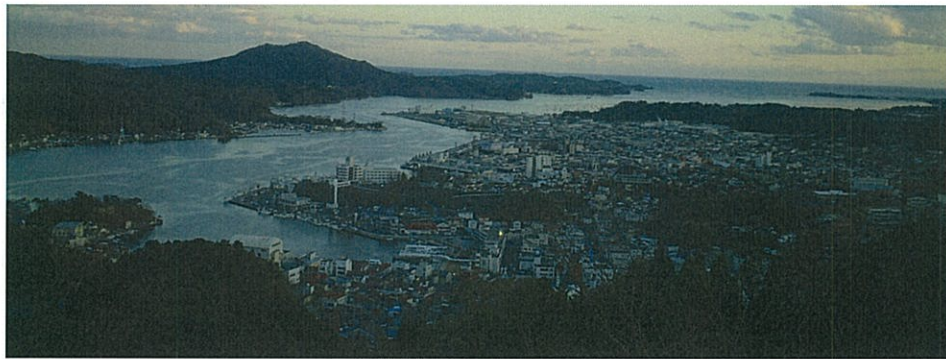


写真-2.1 気仙沼市大川北部地点

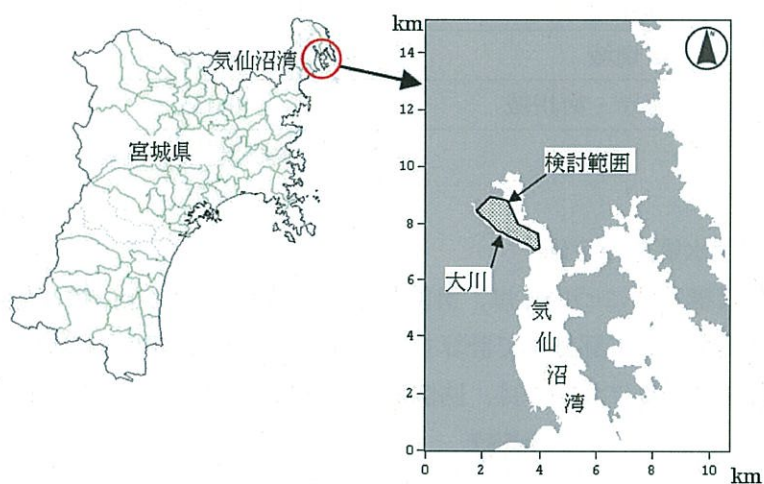


図-2.4 気仙沼市大川北部地点

表-2.2 宮城連動型地震 (L1 地震津波) の断層パラメータ<sup>2)</sup>

断層帯 項目	宮城県沖			文献・計算式	
	A1	A2	B	A	B
緯度(°)*1	38.41	38.20	38.95	地震調査研究推進本部	
経度(°)*1	142.49	142.39	143.52		
上端深さd(km)*1	26	26	14		
長さL(km)*1	36	40	133		
幅W(km)*1	64	36	49		
走向θ(°)*1	200	200	205		
傾斜δ(°)*1	21	21	12		
すべり角λ(°)*2	85	85	90		
地震モーメントMo(Nm)	5.48E+20		6.46E+20	Mo=μDS	
モーメントマグニチュードMw	7.8		7.8	logMo=1.5Mw+16.1	

表-2.3 東北地方太平洋沖地震 (L2 地震津波) の断層パラメータ<sup>4)</sup>

x#	y#	ID	深さ(m)	strike(°)	dip(°)	rake(°)	断層長さ(m)	断層幅(m)	変位量(m)
40.168	144.507	1	1000	193	14	81	100000	100000	20
39.3	144.2	2	1000	193	14	81	100000	100000	10
38.424	143.939	3	1000	193	14	81	100000	100000	35
37.547	143.682	4	1000	193	14	81	100000	100000	10
36.73	143.07	5	1000	193	14	81	100000	100000	7.5
40.367	143.394	6	24200	193	14	81	100000	100000	1
39.496	143.1	7	24200	193	14	81	100000	100000	3
38.62	142.853	8	24200	193	14	81	100000	100000	4
37.744	142.609	9	24200	193	14	81	100000	100000	2
36.926	142.009	10	24200	193	14	81	100000	100000	2

浸水計算における格子設定は、最大 1012.5 m から領域接続により随時縮小していき、最小領域で 12.5 m 間隔とした。格子間隔 1012.5 m, 337.5 m および 112.5 m の領域においては、深海域とみなした線形長波理論による伝搬計算を、それ以降の浸水対象域に近い浅海域では非線形長波理論及び小谷ら(1998)に従った粗度設定と遡上アルゴリズムにより伝搬および浸水計算を行う。図-2.5 に解析領域および初期水位を示す。図-2.5 より、L1 地震津波で初期水位の最大値は約 4m 程度であり、L2 地震津波では約 15 m となる。また、初期水位の生じる領域は、L1 地震津波の場合で約 100 km 程度、L2 地震津波になると約 4 倍程度まで広がる。なお、水深等の地形データは日本測地系データに基づき作成する。



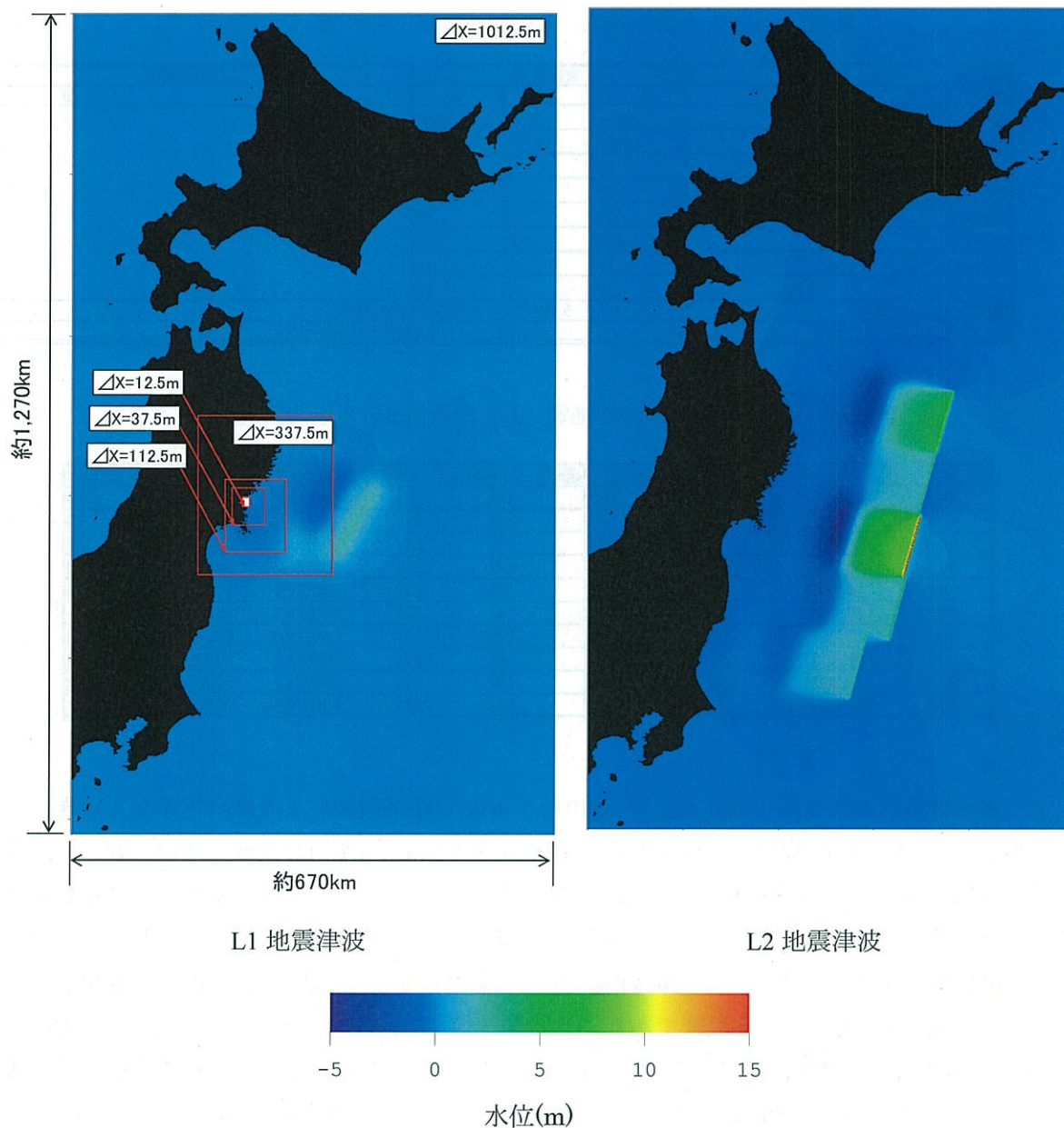


図-2.5 解析領域および初期水位

### 2.2.2 検討対象地点の特性

図-2.6 に本研究における検討対象地点である気仙沼大川北部地点周辺の水深データを示す。大川北部地点周辺の海域は、水深 5～10 m 程度と比較的浅い傾向を示している。図-2.7 に気仙沼大川北部における標高データを示す。大川北部地点はほぼ全域が埋立地であるため、殆どの地域は標高 3～5 m 程度と非常に低く、津波による被害を受けやすい特性を持っている。

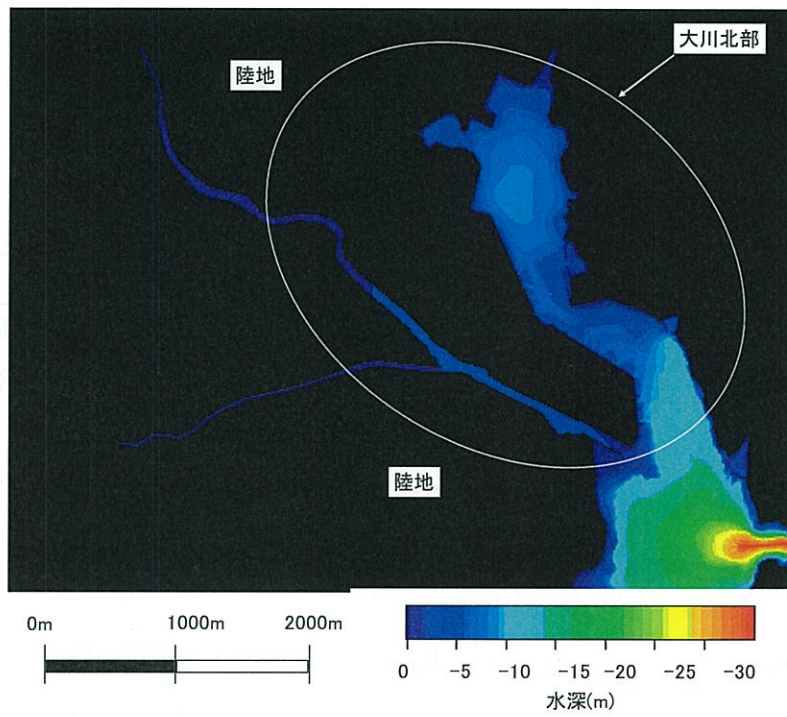


図-2.6 気仙沼大川北部地点周辺の水深

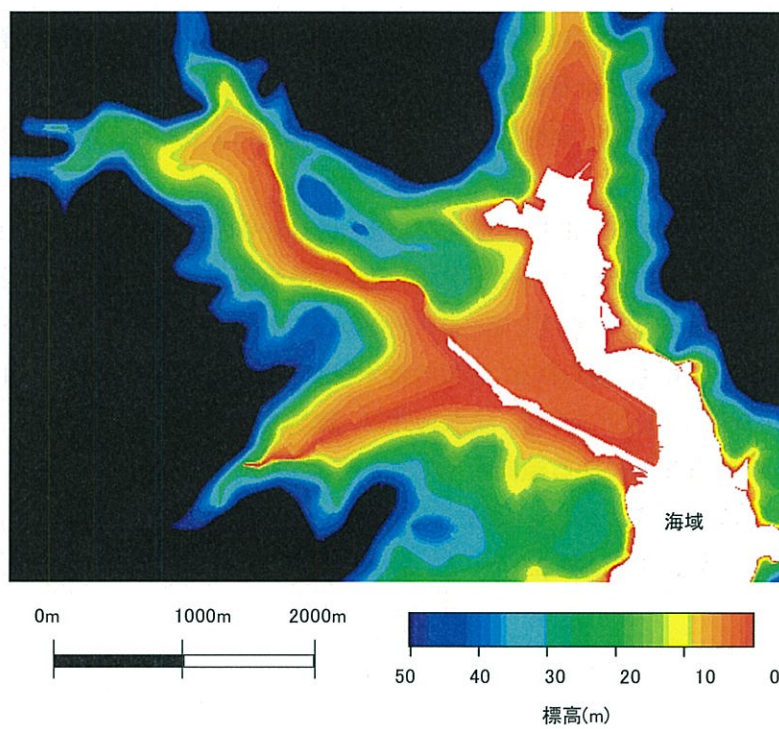


図-2.7 気仙沼大川北部地点の標高



### 2.2.3 検討ケース

以下に L1 地震津波, L2 地震津波における諸条件を示す. L2 地震津波の潮位においては, 計算結果の妥当性確認を行うことを踏まえ, 発災時の諸元と設定する.

表-2.4 検討ケース

津波レベル	想定地震	潮位条件(TP)	適用
L1 地震津波	想定連動型宮城県沖地震津波	1.093m	高潮位時
L2 地震津波	東日本太平洋沖地震津波	-0.57m	発災時

## 2.3 津波浸水被害の評価 ～気仙沼大川北部を対象として～

### 2.3.1 浸水領域 (L1 地震津波, L2 地震津波)

図-2.8 に L1 地震津波 図-2.9 に L2 地震津波における気仙沼大川北部地点の最大浸水領域および浸水高を示す.

L1 地震津波のケースにおいては, 潮見町から魚市場付近にかけてのエリアで浸水が発生しており, 潮見町先端での浸水高 3 m 程度が最大値となっている. また, 北部領域では, 浜町から錦町にかけての浸水が目立つ. その他, 南町付近, 大川からの遡上による九条にかけての浸水が想定される.

一方, L2 地震津波では護岸からの直接的な浸水と大川からの遡上による影響とが合わさり, 魚市場から九条にかけての全域での浸水が見られる. 中には浸水高が 7.5 m 以上の区域もあるなど, 津波レベルにより大きな違いが生じている. 最大浸水高の相違は, 比較的早いタイミングで浸水が発生する潮見町付近で顕著に見られる. 北部の浸水領域は錦町奥部まで及んでおり, その他, 大浦地点での浸水も比較的目立っている. 浸水特性は, 陸域での遡上による影響よりもむしろ護岸付近での浸水の方が大きくなる傾向を示していることが伺える.

本検討により, 津波レベルの違いによる気仙沼大川北部地点の浸水領域は, エリア換算で約 1.5 ～ 1.7 倍, 浸水高では約 2.0 ～ 2.5 倍もの差が生じることが明らかになった.

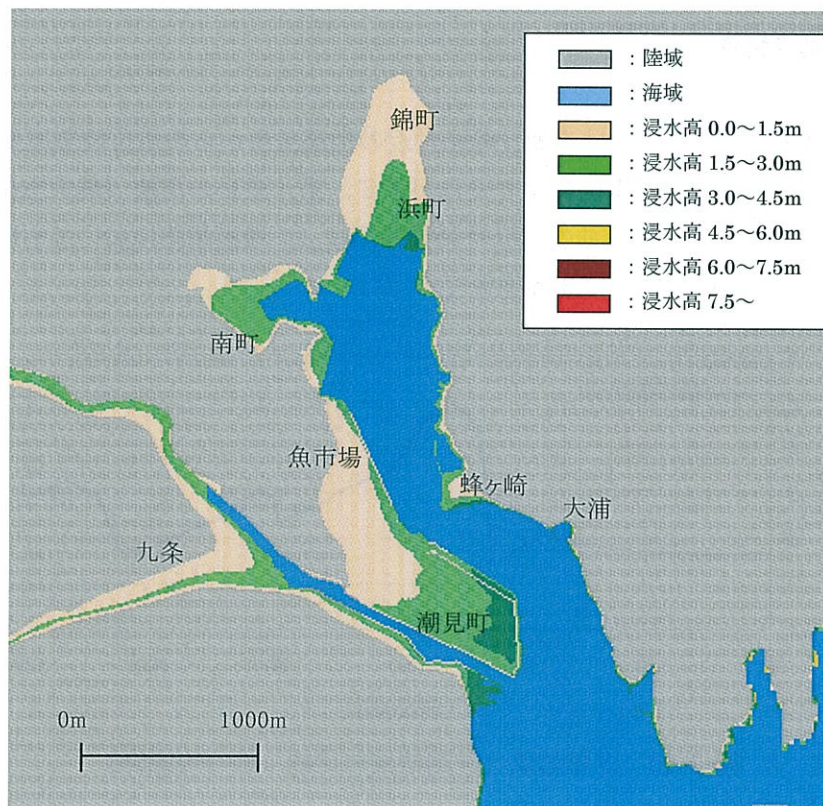


図-2.8 最大浸水領域および浸水高 (L1 地震津波)

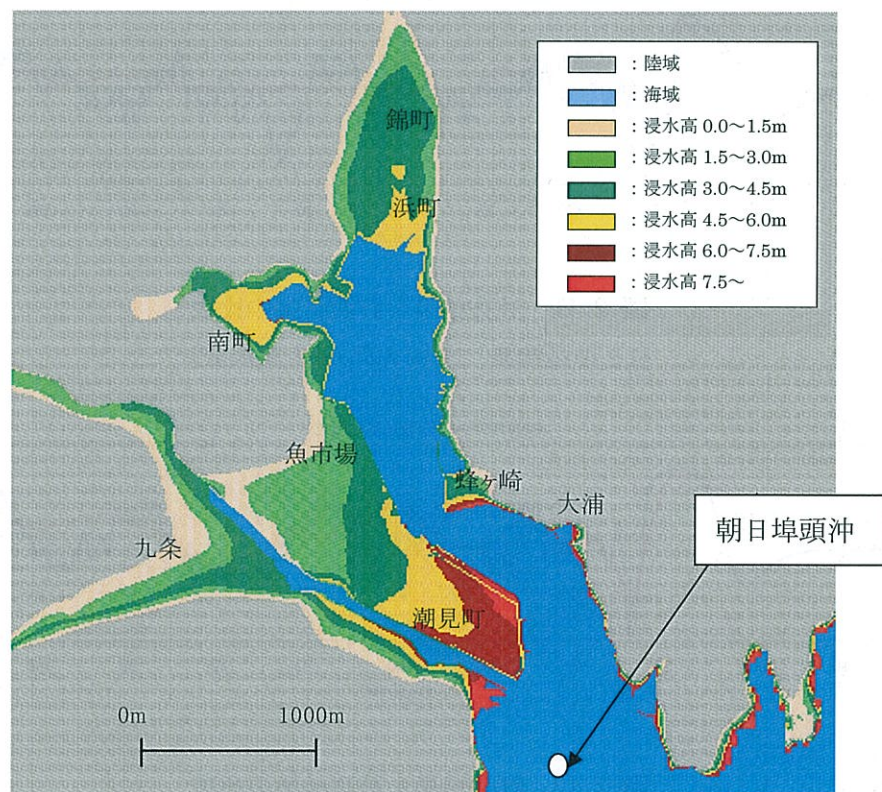


図-2.9 最大浸水領域および浸水高 (L2 地震津波)



### 2.3.2 時刻歴特性

図-2.10 に L2 地震津波における朝日埠頭付近の地震発生からの水位時刻歴例を示す。地震発生から、約 40 分後に水位変動の変化が生じ、第一波目の津波（最大水位 6 m）が最大値を記録している。朝日埠頭沖の水位時刻歴特性は、L1 地震津波においても同様である。L1 地震津波における最大水位は 3 m 前後であった。

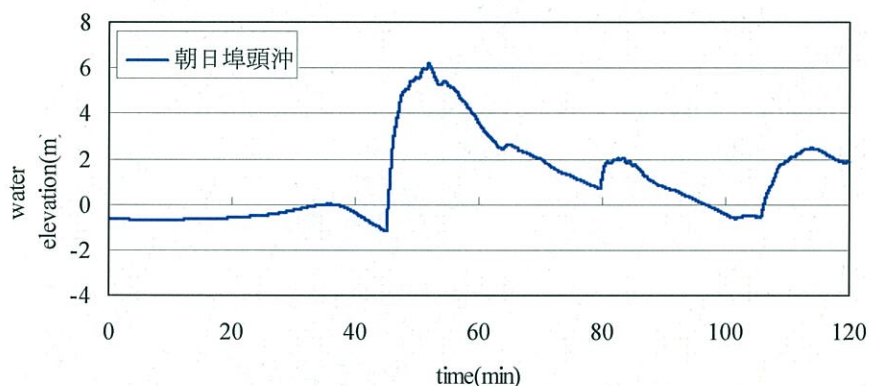


図-2.10 計算結果と計測結果の比較（朝日埠頭沖）

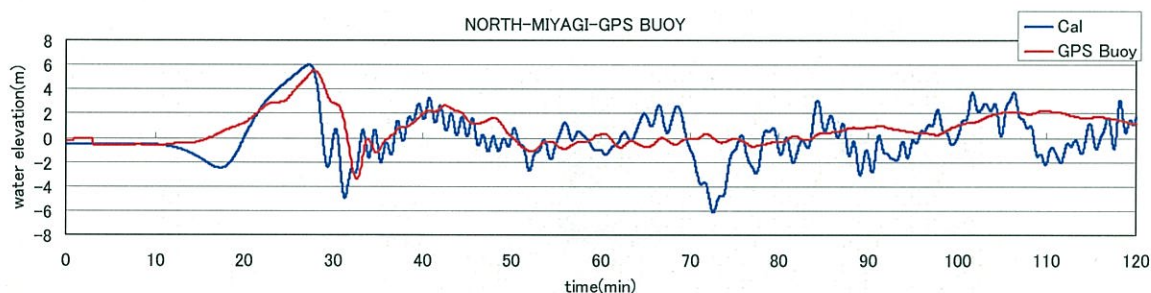


図-2.11 計算結果と計測結果の比較  
(L2 地震津波，宮城北部 GPS 波浪計)

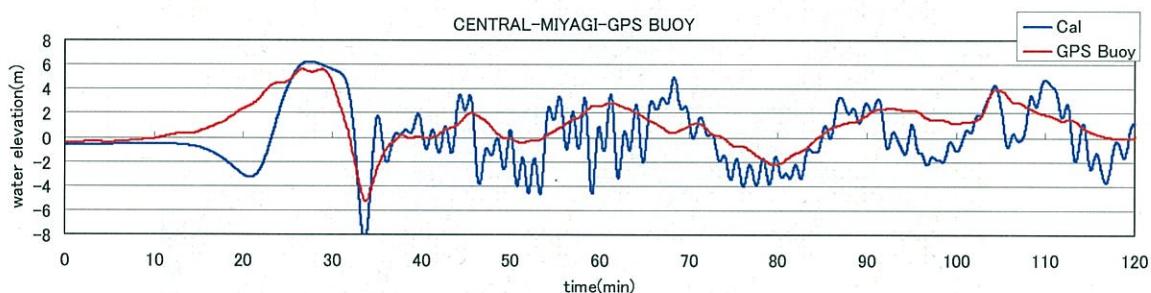


図-2.12 計算結果と計測結果の比較  
(L2 地震津波，宮城中部 GPS 波浪計)

図-2.13 は L2 地震津波における浸水域について、東北地方太平洋沖地震津波発生後の調査結果と解析結果を比較したものである。局所的にやや相違が見られる地点があるものの両者は概ね一致する。

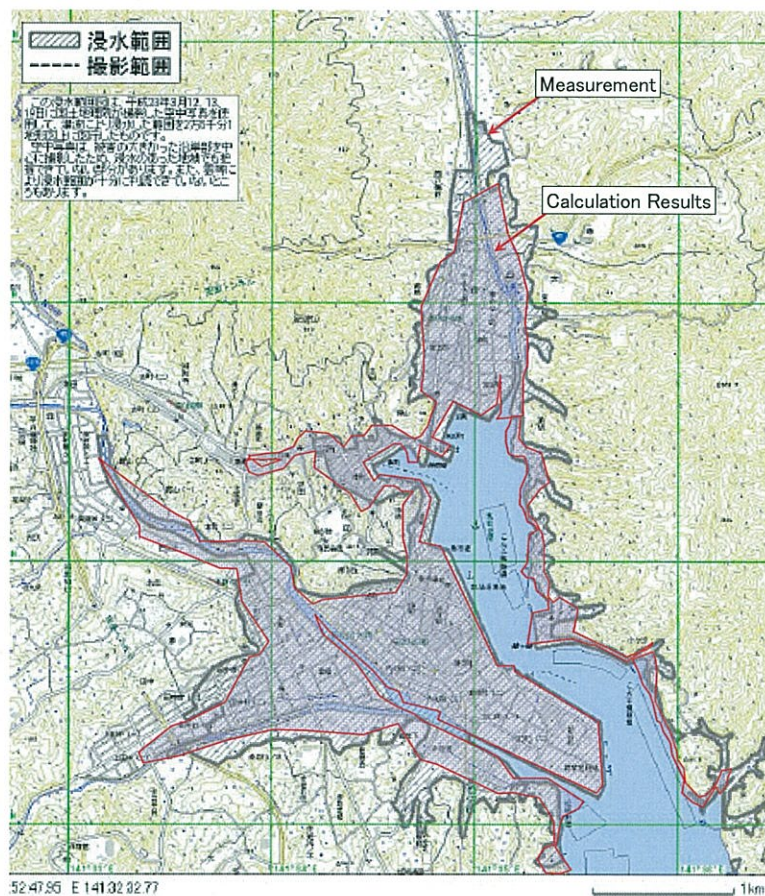


図-2.13 数値計算と測量結果<sup>5)6)</sup>の浸水域の比較 (L2 地震津波)



## 2.4 結論

本章では、津波被害予測の中における浸水被害の評価手法について述べた。また、気仙沼大川北部地点を対象とした浸水予測計算を行い、地震津波レベルの違いによる浸水被害の差について詳細な考察を述べた。浸水予測計算により気仙沼大川北部地点における津波伝播特性は、①第 1 波目（水位変動が発生）の来襲は地震津波レベルの違いによる明確な差は見られず、L1 地震津波、L2 地震津波ともに地震発生から約 40 分後であった。②地震津波レベルの違いによる浸水エリアの相違は大きく、L2 地震津波による浸水エリアは L1 地震津波に比べて約 1.5～1.7 倍、最大浸水高では約 2.0 ～ 2.5 倍もの差が生じた。ことが得られた。また、L2 地震津波を対象に気仙沼地点の浸水域について測量値と計算値を比較した。その結果、両者はともに一致することを確認し用いた計算手法の妥当性を示した。

## 参考文献

- [1] 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫 : GISを利用した津波遡上計算と被害推定, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.356-360, 1998.
- [2] 宮城県防災会議地震対策専門部会:宮城県沖地震被害想定調査に関する報告書, 138p., 2004. [http://www.pref.miyagi.jp/kikitaishaku/jishin\\_chishiki/3higaishin/sanzihigaitop.htm](http://www.pref.miyagi.jp/kikitaishaku/jishin_chishiki/3higaishin/sanzihigaitop.htm).
- [3] L.Mansinha, and D.E.Smylie : The displacemente fields of inclined faults, *Seismol. Soc. Amer.*, Vol.61, pp.1433-1440, 1971.
- [4] 今村文彦, 越村俊一, 村嶋陽一, 秋田善弘, 新谷勇樹 : 東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施, 東北大学モデル (version1.2), 12p., 2012.
- [5] 国土地理院, 気仙沼市浸水エリアマップ, 1p., 2011.3 月 22 日.  
[www.gsi.go.jp/common/000059844.pdf](http://www.gsi.go.jp/common/000059844.pdf).
- [6] 柴山知也 : 3.11 津波で何が起きたか被害調査と減災戦略, 72p., 2012.



## 第3章 船舶漂流による被害の評価

本章では、津波による船舶漂流による流出・衝突被害の予測に関して検討する。初めに新たに構築した解析コードについて述べるとともに、水理模型実験結果に対する再現計算を行い、妥当性の確認を行う。次に、気仙沼大川北部地点を対象とした船舶の漂流挙動計算を行い、船舶の漂流による流失や、座礁被害について詳細な考察を行う。

### 3.1 漂流物の挙動解析手法の概要

#### (1) 漂流物の挙動予測手法

漂流物の挙動解析を実施するにあたって重要となるのは、漂流物の特性および津波伝播計算を高精度で再現することである。本研究では、漂流物の特性を容易に考慮可能とすることを特徴としたシミュレーション手法を新たに構築する。

本手法の基本方程式は、式(3.1)を用いる。

$$M \ddot{X}_G = \sum_{n=1}^k (F_G + F_F + F_C + F_D) \quad (3.1)$$

ここに、 $M$  は質量、 $k$  は漂流物の構成要素数、 $\ddot{X}_G$  は重心位置の加速度、 $F_G$  は重力、 $F_D$  は流体力、 $F_F$  は接触力、 $F_C$  は粘性減衰力を表す。漂流物の 3 次元的な挙動は、重心位置の並進および回転に関する 6 自由度の運動方程式により求める。

流体力は、藤井ら (2005) と同様に流速成分から  $x$  方向を例として、次式に示すモリソン式を適用する。なお式(3.2)における抗力係数は、次項において表記する Yaw 角度別の抗力係数を用いて漂流物毎に設定する。

$$F_x = \frac{1}{2} C_{Dx} \rho u |u| A_x + C_M \rho \frac{\partial u}{\partial t} V \quad (3.2)$$

ここに、 $\rho$  は水の密度、 $C_{Dx}$  は  $x$  方向の抗力係数 (水理模型実験により算出)、 $u$  は  $x$  方向の相対流速、 $A_x$  は  $x$  方向の投影面積、 $C_M$  は慣性力係数 (1.0)、 $V$  は水中部分の体積を表す。

粘性減衰力は、本検討では減衰係数  $C_{DD}$  と水線面積  $A$  を用いて評価し、本稿では上下運動 (Heave) のみ  $C_{DD}=0.1$  として考慮する。



$$F_D = \frac{1}{2} C_{DD} \rho (\dot{X}_G - \bar{U}) \left| \dot{X}_G - \bar{U} \right| A \quad (3.3)$$

ここに、 $\dot{X}_G$ は重心位置の速度、 $\bar{U}$ は水線部の流速の平均値を表す。接触力については、目黒ら(1988)による個別要素法に基づく手法にて評価する。漂流物へ作用する回転モーメントについては、漂流物を構成する個別の要素中心位置、壁との接触に対しては接触力および接触点から重心までの距離(アーム長)を用いる。また、流体力、浮力および重力による回転モーメントは各構成要素の中心点に作用する力と重心までの距離を用いてそれぞれ算出する。流体力を評価する際の水位・流速は別途に解析を行い、その解析結果の時系列データを用いて漂流シミュレーションを実施する。したがって、本研究では漂流物による波浪場への直接的な影響は考慮していない手法となる。

本手法の特徴および新規性は、これまでの研究である拡張個別要素法(例えば、藤井ら(2005))、MPS法(例えば、後藤ら(2009))では漂流物を独立した要素の集合体として評価するため、船舶工学に基づく漂流物自体の特性(粘性減衰力や Heave 減衰力など)を考慮できない課題を解消できる点である。また、実験結果に基づく流向毎の抗力特性を漂流物へ反映できる点、内部摩擦の生じない完全剛体として漂流物をモデル化しているため、漂流物自体が壁、他の漂流物などに接触する前後以外は波と同等な時間間隔での解析が可能である点、既往の船舶工学の研究を参照して漂流物の粘性減衰係数を設定すれば実験等との合わせこみを必要とするパラメタがない点などが挙げられる。

## (2) 挙動の不確実性の評価

計算における津波流体力の不確実性評価は流体力の算定結果を平均値にとる正規分布関数に基づく拡散項を各計算ステップに反映させる方法を用い、拡散係数は後藤ら(1982)を引用している。式(3.4)に無次元拡散係数を示す。

$$\frac{\kappa}{u_* h} = 0.032 \quad (3.4)$$

ここに、 $\kappa$ は拡散係数、 $u_*$ は摩擦速度、 $h$ は水深をそれぞれ示す。解析においては、津波流速から得られる各ステップの変位量に、式(3.4)を満足する分散の一樣分布乱数を発生させた後の地点を確定値として評価する。なお、後藤らの拡散係数は漂流物の直線的な移動量に対する分散であり、本研究のように漂流物同士や護岸への衝突を含めた現象を解く場合には、衝突後に変位のばらつきを考慮すると、挙動に多大な影響を与える。そこで、本検討では運動方程式に直接不確実性を反映させるようにアレンジし、1ステップ前の漂流物の速度を用いて拡散係数を変形し、流体力の評価に適用させるようにする。

流体力は一樣乱数  $\alpha$  と式(3.5)に変形した拡散係数  $\kappa'$  を用いて式(3.5)で表される。

$$Fc_t \Rightarrow \kappa' Fc_t \quad (3.5)$$

$$\kappa' = 1 + \alpha \frac{M}{Fc_{t-1}} dt^2 \sqrt{2dt\kappa} \quad (3.6)$$

ここに、 $\alpha$  は 1 ステップ前の加速度、 $Fc_{t-1}$  は 1 ステップ前の流体力、 $dt$  は計算時間間隔をそれぞれ示している。なお、式(3.6)の右辺第二項は変位の分散を運動方程式に導入する上で、漂流物の速度の影響を 1 ステップ前の流体力、漂流物の速度を用いて考慮したものである。

### (3) 護岸の破壊判定における衝突力

護岸の破壊の有無の評価を行う際の護岸への衝突力は、個別要素法により解析的に評価することも可能であるが、解析上のノイズが発生しやすいことや、衝突の仕方（例えば、衝突している要素数に違いが生じると衝突力が大きく変化する）によって衝突力に大きなばらつきが生じやすい。そのため、本研究では護岸の破壊判定に用いる衝突力  $F_m$  は簡略化を図り、水谷ら（2009）が提案した漂流物全体としての衝突力の評価方法である式(3.7)で近似して用いる。

$$F_m = \rho L d V_t + M \alpha_t \quad (3.7)$$

ここに、 $V_t$  は小型漁船の漂流速度、 $L$  は漂流物の長さ、 $d$  は漂流物の高さ、 $M$  は重量、 $\alpha_t$  は船舶の加速度をそれぞれ示している。なお、本研究においては、漂流物の長さ、高さをを用いず排水質量にて評価する。

## 3.2 解析手法の妥当性の確認

### 3.2.1 水理模型実験の概要

本研究では、五洋建設株式会社技術研究所内において水理模型実験を実施する。実験は断面水槽に一樣流を発生させて漂流物の流向別の抗力係数を計測する実験（以下、抗力実験）および、空荷状態の単独もしくは複数のコンテナを配置した矩形水槽に段波を発生させて、その挙動を計測する実験（以下、漂流実験）についてそれぞれ実施する。フルードの相似則に従って縮尺 1/15 とする。抗力実験においては、断面水槽（長さ 50m×幅 0.6m×高さ 1.2m）にて分力計（2 軸、サンプリング間隔 20Hz）を介して模型を固定した状態で一樣



流を作用させ、模型への作用流体力を測定する。図-3.1に抗力実験の模式図を示す。

実験においては、流速および喫水に加え、模型の向きを変化させたケースについて実施し、流向別の抗力特性を把握することを目的とする。実験に用いた漂流物の模型は、20 フィートコンテナ、汎用自動車ならびに小型漁船を対象とする。図-3.2 から 図-3.4 にコンテナ、自動車および小型漁船模型をそれぞれ示す。また、表-3.1 から 表-3.3 にそれぞれの模型諸元を示す。なお、汎用自動車と小型漁船については、市販のプラモデルを加工して実験に用いている。

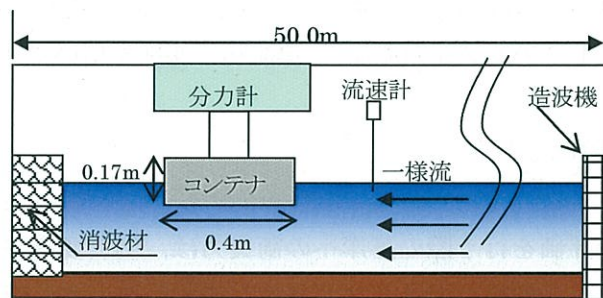


図-3.1 抗力実験の模式図

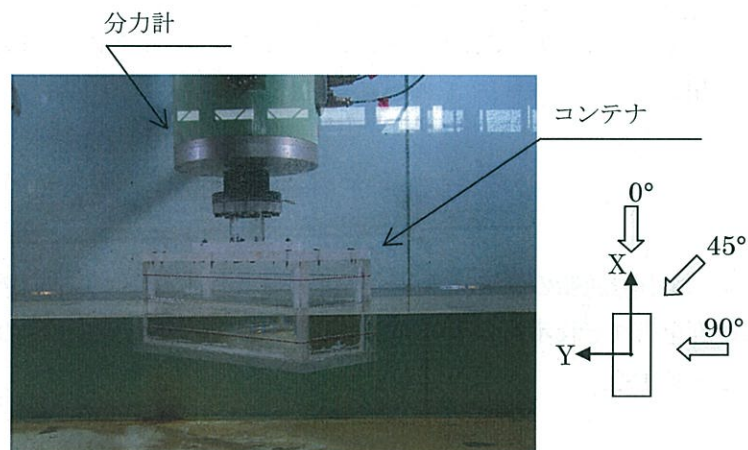


図-3.2 コンテナ模型

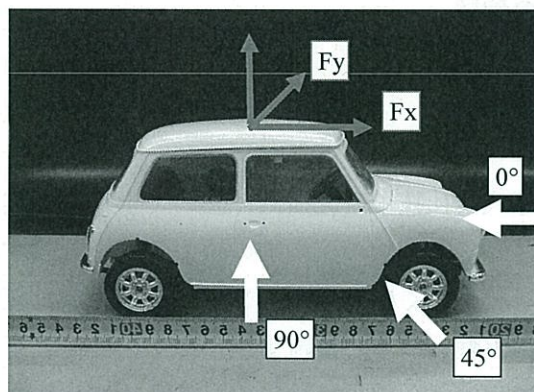


図-3.3 自動車模型（流向の定義）

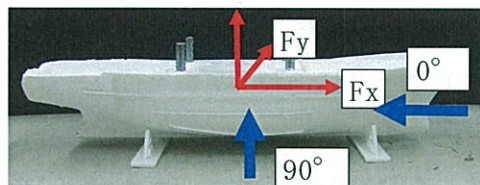


図-3.4 小型漁船模型（流向の定義）

表-3.1 コンテナ模型の諸元

名 称	数 量	単 位	摘 要
長さ	0.4	(m)	
幅	0.17	(m)	
高さ	0.17	(m)	
質量	0.65	(kg)	空荷時

表-3.2 自動車模型の諸元

名 称	数 量	単 位
長さ	0.24	(m)
幅	0.115	(m)
高さ	0.08	(m)
質量	0.417	(kg)

表-3.3 小型漁船模型の諸元

名 称	数 量	単 位
長さ	0.25	(m)
幅	0.09	(m)
高さ	0.08	(m)
質量	0.315	(kg)

表-3.4 実験ケース（抗力実験）

流向	平均流速	模型の喫水		
		コンテナ	自動車	小型漁船
0°				
22.5°	0.3m/s	0.04m	0.04m	0.03m
45.0°	0.4m/s	0.08m	0.08m	0.05m
67.5°	0.5m/s	0.12m		
90.0°				

漂流実験は別の中型水槽（長さ 8 m × 幅 1 m × 高さ 1 m）にて行い、津波は水槽内をゲートで仕切り、水位差を設けた状態でゲートを開放することで発生させる。図-3.5 に漂流実



験の配置図を示す。水槽内には、2つの斜面を有する陸地を設置することで、漂流物の斜面への衝突や、陸地での座礁の発生を促した。陸地側の水位は0.05 mに固定しておき、ゲート内部側の水位差を変化させたケースについて実験を行う。なお、実験は、コンテナおよび自動車を対象に行うこととする。

実験時には、漂流物（コンテナもしくは自動車）に2点のマーカをつけておき、それを4台のビデオカメラで撮影し、3自由度の変位を解析することで津波に対する単独及び複数の漂流物の挙動や座礁位置及び衝突状況を把握する。動画解析におけるサンプリング間隔は10Hzとする。また、図-3.5中のNo.1からNo.4の表記は水位計および流速計の設置位置を示しており、サンプリング間隔は20 Hzにてそれぞれ計測する。

実験を行う際の漂流物の初期配置は、陸地水平部における中央位置に設置し、設置角度を変化させた実験および2つの漂流物を同時に配置した実験などを実施する。コンテナの模型質量は空荷状態のカタログ値とほぼ同等となるように調整を行う。また、自動車については運転席等の内部への浸水を防止するために、各ドアの開閉部に防水処理を施しておく。表-3.5に漂流実験における実験ケースを示す。

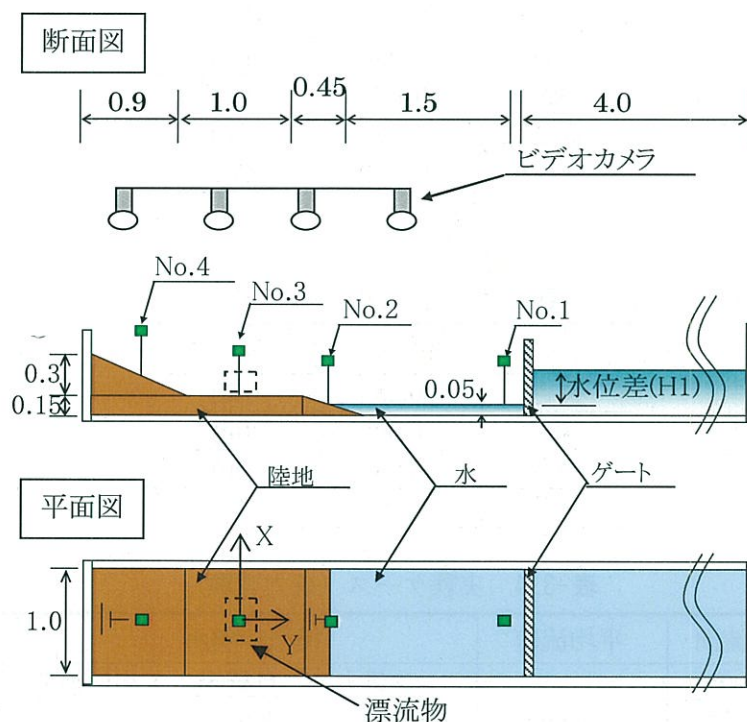


図-3.5 漂流実験の配置図

表-3.5 実験ケース（漂流実験）

漂流物の 配置数	対象漂流物	漂流物の 初期配置	水位差 (H1)
単独	コンテナ (空荷時)	0°	0.2m
		45°	0.3m
		90°	
2 つ配置	自動車	並列	0.2m

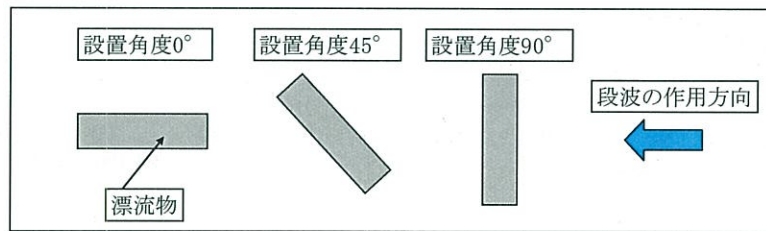


図-3.6 設置角度の定義

### 3.2.2 抗力実験結果

#### (1) コンテナ

図-3.7 にコンテナ抗力係数の算出結果を示す。抗力係数は、計測した流体力から投影面積および水平流速の計測値の2乗で除して算出する。図中の計測値は、流速および喫水を変化させた実験結果より算出した抗力係数の平均値を流向毎にプロットしたものであり、曲線は、計測結果の0°と90°における抗力係数の最大値、および参考文献[6]をもとに構築した結果（式(3.8)、および式(3.9)）を示している。なお、同じ流向の条件下で、喫水や流速が異なる場合の抗力係数の算出結果を比較した場合では、同じ流向でも流速や喫水条件が異なるにつれ抗力係数に差異が生じている。しかしながら、流向が異なる場合における結果ほど大きな差は生じていないため、本研究では、喫水や流速の違いによる影響を考慮せずに平均値を用いて評価して差し支えないと判断している。両者は、流向によってはややばらつきが見られるものの概ね一致する傾向を示しており、コンテナの流向別の抗力係数は式(3.8)および(3.9)を用いて評価できるものと考えられる。この抗力特性を漂流物の挙動解析に反映する。

コンテナの流向別の抗力係数の算定方法

$$C_{Dx} = 1.3(1 - \sin^2 \theta) \quad (3.8)$$

$$C_{Dy} = 1.9 \sin^2 \theta \quad (3.9)$$

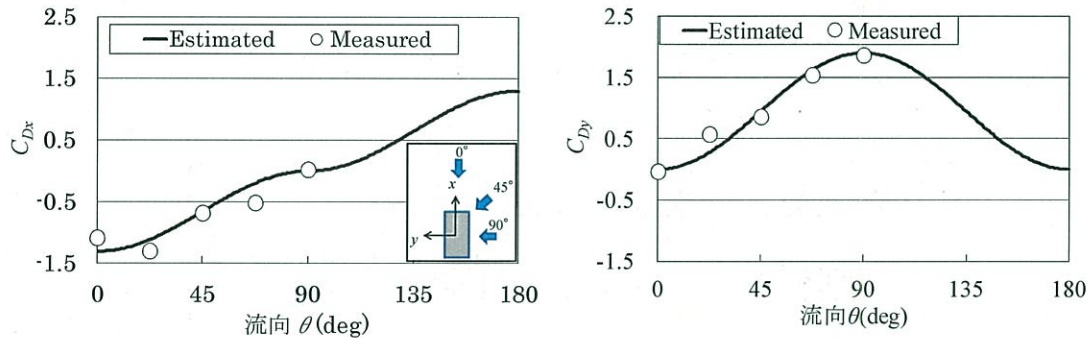
ここに,

$C_{Dx}$ : コンテナの短手方向の抗力係数

$C_{Dy}$ : コンテナの長手方向の抗力係数

$\theta$ : 流向 (deg)

である.



抗力係数算定結果 (x 方向)

抗力係数算定結果 (y 方向)

図-3.7 流向別の抗力係数 (コンテナ)

## (2) 自動車

図-3.8 中のプロットは、汎用自動車を対象に行った喫水および流速を変化させた実験結果の角度毎の平均値を、曲線は 6 次の近似線をそれぞれ示したものである。自動車の x 方向の抗力係数は、真正面よりもややずれた角度において最大値をとる。また、y 方向は  $62.5^\circ$  から  $112.5^\circ$  にかけてほぼ一定の最大値をとる傾向を示している。これらの原因としては自動車自体の形状特性による影響が大きいと思われる。角度によっては、抗力係数に多少のばらつきはあるものの、自動車の抗力特性は図中の近似曲線を用いて評価できるものと考えられる。

汎用自動車の流向別の抗力係数の算定方法

$$C_{Dx} = -2.0 \times 10^{-12} \times \theta^6 + 8.0 \times 10^{-10} \times \theta^5 - 1.0 \times 10^{-7} \times \theta^4 + 4.0 \times 10^{-6} \times \theta^3 + 4.0 \times 10^{-4} \times \theta^2 - 1.87 \times 10^{-2} \times \theta - 9.863 \times 10^{-1} \quad (3.10)$$

$$C_{Dy} = 4.0 \times 10^{-12} \times \theta^6 - 2.0 \times 10^{-9} \times \theta^5 + 4.0 \times 10^{-7} \times \theta^4 - 4.0 \times 10^{-5} \times \theta^3 + 1.3 \times 10^{-3} \times \theta^2 + 6.9 \times 10^{-3} \times \theta - 1.2 \times 10^{-3} \quad (3.11)$$



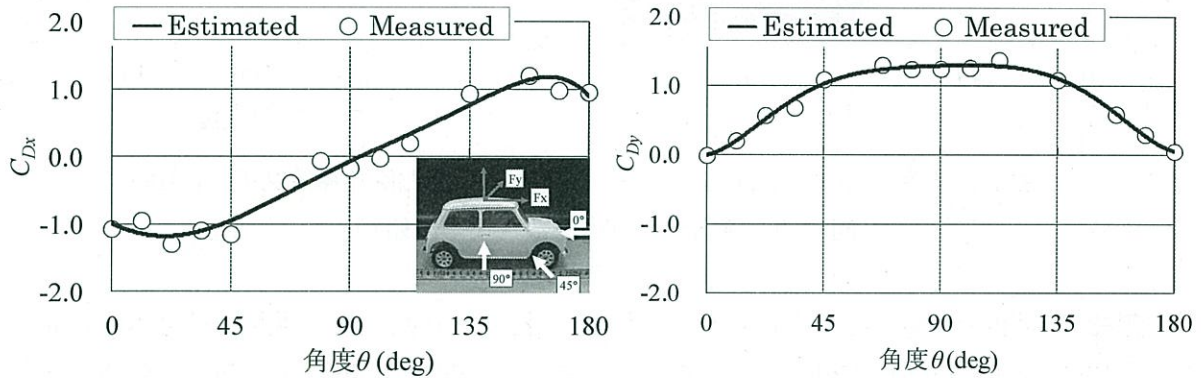
ここに,

$C_{Dx}$ : 汎用自動車の短手方向の抗力係数

$C_{Dy}$ : 汎用自動車の長手方向の抗力係数

$\theta$ : 流向 (deg)

である.



抗力係数算定結果 (x 方向)

抗力係数算定結果 (y 方向)

図-3.8 流向別の抗力係数 (汎用自動車)

### (3) 小型漁船

図-3.9 中のプロットは, 小型漁船を対象に行った喫水および流速を変化させた実験結果の角度毎の平均値を, 曲線は 3 次の近似線をそれぞれ示したものである. 小型漁船の  $x$  方向の抗力係数は, ほぼ線形的な変化を示している. また,  $y$  方向はほぼコンテナと同様の傾向を示すもののピーク値はコンテナの場合の約 0.5 倍まで低下している. 角度によっては, 抗力係数に多少のばらつきはあるものの, 小型漁船の抗力特性は図中の近似曲線を用いて概ね評価できるものと考えられる.

小型漁船の流向別の抗力係数の算定方法

$$C_{Dx} = -9.0 \times 10^{-6} \times \theta^2 + 8.3 \times 10^{-3} \times \theta - 0.6459 \quad (3.12)$$

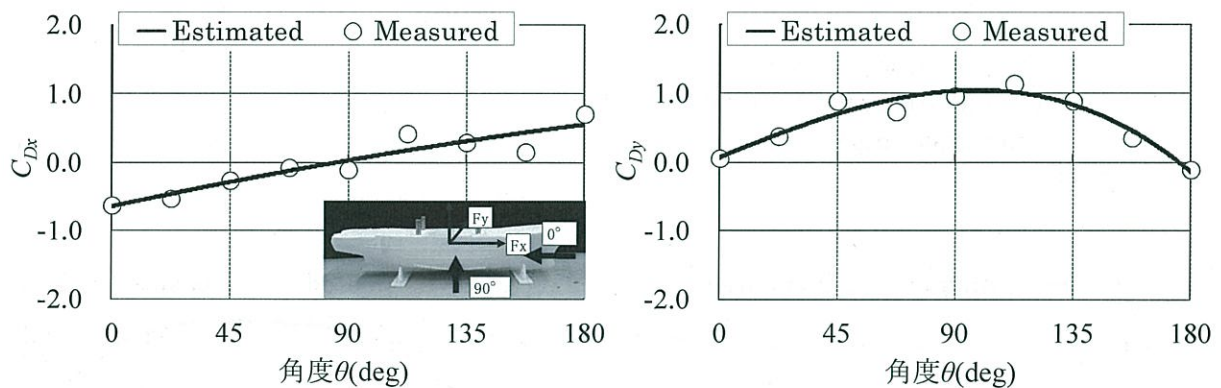
$$C_{Dy} = -4.0 \times 10^{-7} \times \theta^3 - 2.0 \times 10^{-3} \times \theta^2 + 1.56 \times 10^{-2} \times \theta + 0.0695 \quad (3.13)$$

ここに,

$C_{Dx}$ : 小型漁船の短手方向の抗力係数

$C_{Dy}$ : 小型漁船の長手方向の抗力係数

$\theta$ : 流向 (deg) である.



抗力係数算定結果 (x 方向)

抗力係数算定結果 (y 方向)

図-3.9 流向別の抗力係数 (小型漁船)

図-3.10 に抗力実験に関するレイノルズ数の比較結果を示す. なお, 模型実験における抗力係数は, 流軸方向別に抽出し直して整理し, レイノルズ数の評価における代表径は, 流向と直角方向の投影長さを定義している. また, 図中の実物スケールのプロットは, 実物スケール相当のコンテナ, 車, 漁船について相対流速毎に整理した結果である. 図-3.10 より, 本研究における模型スケールの抗力係数算出は, レイノルズ数の違いによる顕著な変化が見られない. 漁船などの漂流物の挙動を解くための漂流力は, 絶対流速ではなく相対流速の影響を受けるため, 実際の現象として漂流がしている場合とそうでない場合とで実物スケールのレイノルズ数は大きく変化する. 一般的に, 物体や表面材質により変化はするものの, 鋼杭などの抗力係数はレイノルズ数が  $1 \sim 10^3$  では, 渦の励起により抗力係数が極端に大きくなり,  $10^3 \sim 10^8$  ではほぼ一定の抗力特性を持ち,  $10^8$  前後を遷移点にとって, それ以降急速に低下する傾向がある. 実験を行ったレイノルズ数は, 遷移点や渦の励起する条件ではなく, また現地状態では, 漂流物がある程度漂流を始めて津波流速に近づいた後の状態を再現した実験であることがわかる.

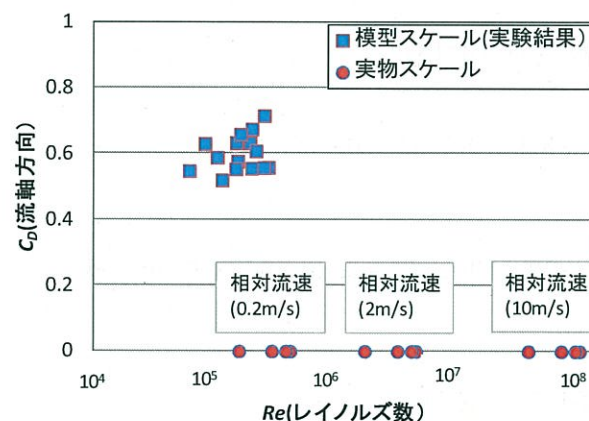


図-3.10 模型と実物大のレイノルズ数の比較

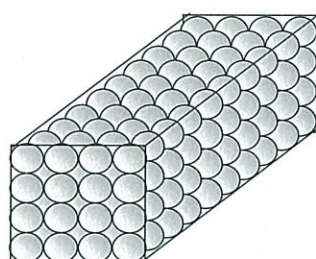
### 3.2.3 実験結果の再現計算

#### (1) 漂流物のモデル化

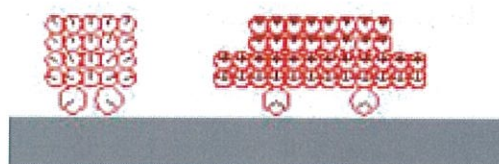
実験の再現解析におけるコンテナおよび自動車は、複数の個別要素の剛体集合体として以下の図に示すようにモデル化を行う。

表-3.6 解析モデル

模型	要素数	1 個当りの要素半径
コンテナ	160 (4 個×4 個×10 個)	0.04m
自動車	104 (20 個×5 個+4 個 (タイヤ))	0.04m (タイヤは 0.05)



コンテナのモデル



自動車のモデル

図-3.11 漂流物のモデル (コンテナ, 自動車)

#### (2) 波浪場の再現計算

漂流物の挙動再現計算を行うに先立ち、CADMAS-SURF (参考文献 7) により段波の波浪場を再現する。CADMAS-SURF は、2 次元非圧縮流体のナビエストークス式と連続式を基礎式とし、自由水面境界モデルに VOF 法を用いた手法であり、近年その適用性が概ね認められた解析コードである。実験を行った矩形水槽 (図-3.5) は、X 方向に対し一様に構築しているため、漂流シミュレーションの実施にあたり必要となる計算モデルは、2 次元コードとしゲート開放後の状態を模擬した階段状の初期水面を初期条件として与える手法を用いる。

図-3.12(1)に水位差 0.3 m のケースにおける No.1 地点 (図-3.5 参照) の水位の実験結果と解析結果の比較結果を、図-3.12(2)に同地点における流速の比較結果を示す。図より、押波ピーク周辺において水位・流速ともに解析結果の方がやや大きくなる傾向を示しているものの、両者は概ね一致している。長軸 (Y) 方向に対しては CADMAS-SURF の計算で再現された水位、流速データを漂流物の挙動解析に用いる。短軸 (X) 方向については、漂流物を設置していない実験時に計測された X 方向の流速値には、微小な成分(最大流速 0.05



m/s 程度)が検出されており、同じ条件で 3 回実験を繰り返したところ、すべてほぼ同様の傾向を示している。これは、矩形水槽に微量の歪みが生じているために引き起こされる微振動であると考えられる。そこで、本研究では、X 方向流速については、実験時に複数点測定した計測値を空間的に補完して漂流物の挙動解析に用い、流れ場の三次元性を近似的に考慮する。

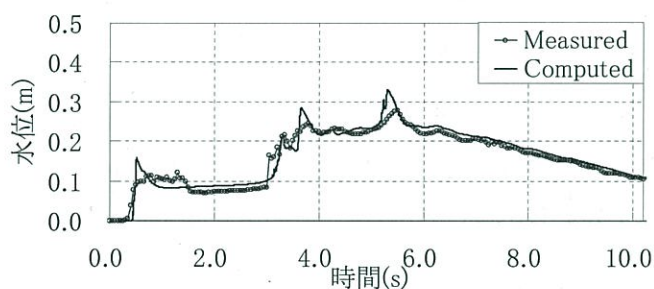


図-3.12(1) 実験と解析の水位の比較 (波高計 No.1, 水位差 0.3 m)

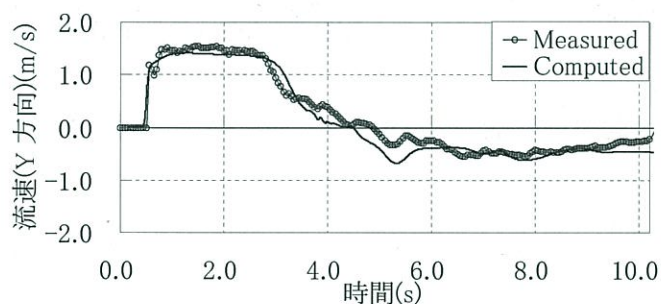


図-3.12(2) 実験と解析の Y 流速の比較 (波高計 No.1, 水位差 0.3 m)

### (3) 漂流物の挙動解析による実験再現結果 (抗力係数の違いによる影響)

算出した流向別抗力係数の妥当性を確認するために、コンテナを単独に配置した場合のコンテナの挙動について、前節で記述したコンテナの流向別の抗力係数を用いた漂流シミュレーションの結果 (流向別に変化) と抗力係数を一定とした場合の結果 (一定値) を、それぞれ実験結果と比較した。図-3.13 にコンテナ重心位置の Y 方向の漂流軌跡とゲート開放からの時間の関係を比較した結果を示す。なお、一定値と表記したケースについては藤井ら<sup>1)</sup>の手法と同様に抗力係数を 1.0 として一律に設定した上で、漂流シミュレーションを実施した結果である。

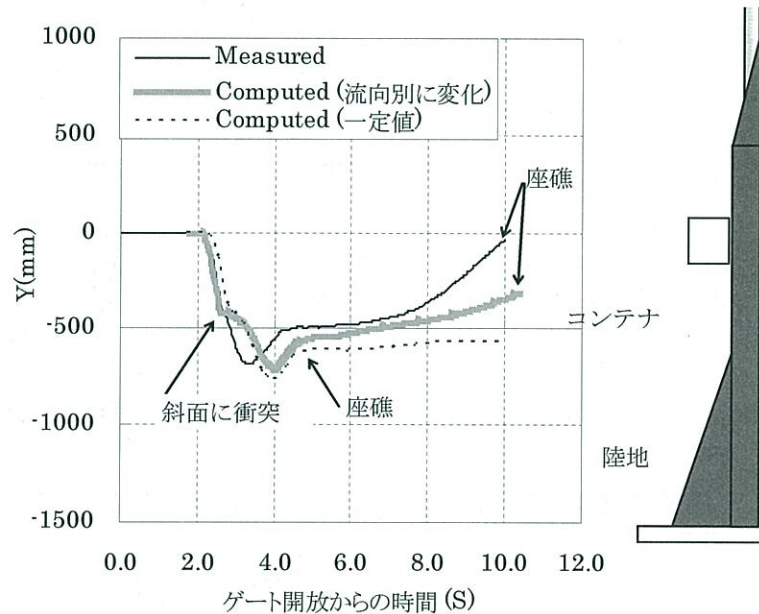


図-3.13 実験結果と解析結果の漂流軌跡の比較  
(設置角  $0^\circ$ ，水位差 0.2 m)

実験におけるコンテナの挙動は，ゲート開放から約 2.0 s 後に押し波の影響により漂流を開始し，3.0 s 付近で斜面法尻に衝突後，斜面上を遡上していく．そして，引き波の発生によりほぼ初期位置まで漂流し，水位がコンテナの喫水を下回った時点で座礁する．解析においては，両者とも斜面法尻へ衝突した後の，斜面への遡上速度が実験結果と異なる傾向を示しているが，一定値のケースでは引き波時に斜面上に座礁しており，流向別に変化のケースの方が座礁位置に関しては，実験結果との整合がより良好である．よって，本研究において実験的に算出した流向別の抗力係数を用いることで実験結果の漂流軌跡や座礁位置の再現性が向上すると考えられる．また，解析結果においては，斜面上の遡上が実験結果よりもやや大きくなる傾向を示している．これは，数値波動水路による水位の再現計算結果が，ピーク周辺で実験結果よりも大きくなる傾向であるために，漂流シミュレーションの結果へ多少の誤差を与えているものと考えられる．

(4) 漂流物の挙動解析による実験再現結果 (コンテナ単独配置)

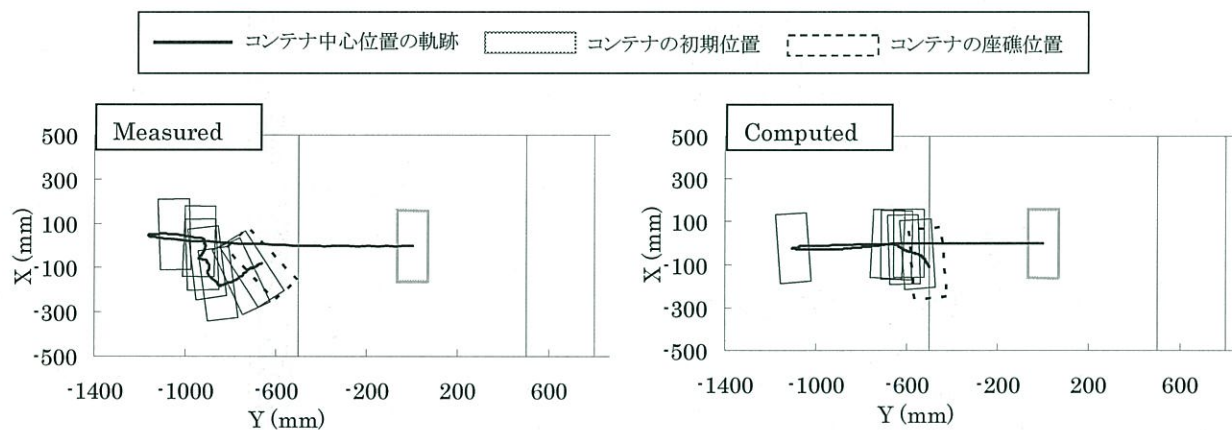


図-3.14(1) 漂流軌跡の比較 (設置角  $90^\circ$ , 水位差 0.3m)

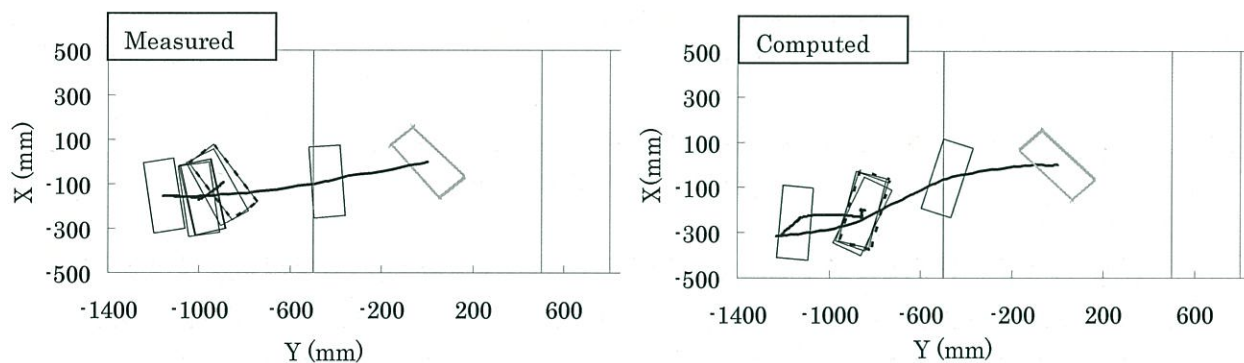


図-3.14(2) 漂流軌跡の比較 (設置角  $45^\circ$ , 水位差 0.3 m)

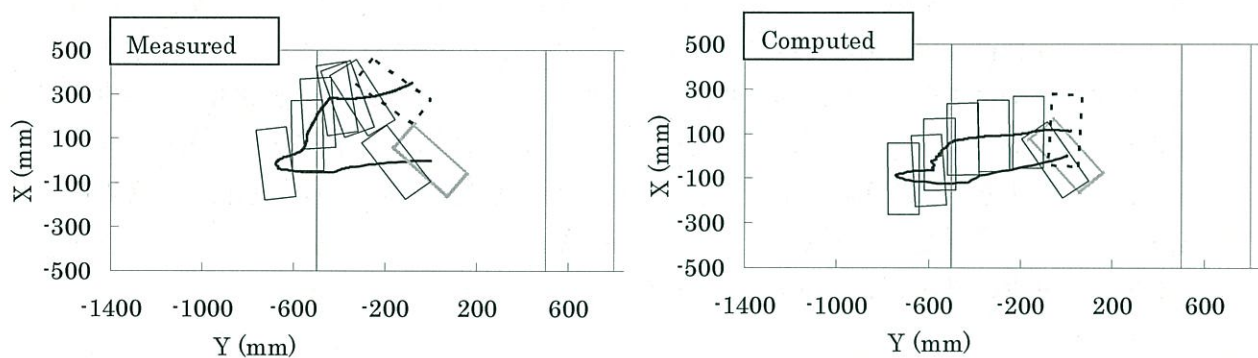


図-3.14(3) 漂流軌跡の比較 (設置角  $45^\circ$ , 水位差 0.2 m)



図-3.14 漂流軌跡の比較 (コンテナ単独配置)



図-3.14(1)および 図-3.14(2)に水位差 0.3 m でコンテナを単独で配置したケースにおける実験結果と解析結果との漂流軌跡の比較を示す。図-3.14(1)は、コンテナを段波の来襲方向に対し 45°傾けて配置した場合の結果を示している。なお、解析結果は本研究で得られた流向別の抗力係数を用いる手法による結果を示している。

実験における水位差 0.3 m のケースでは、押し波時に斜面上を遡上し、引き波時には斜面上に座礁する結果であった。また、設置角 90°の場合は初期の受流面積が大きいためか、45°の場合よりも引き波時の移動量が大きい。解析結果においては、座礁時のコンテナの向き、および X 方向の移動距離がやや実験結果と異なるものの、Y 方向の座礁位置については、ほぼ実験結果を再現できている。また、実験結果において初期の設置角の違いにより、座礁位置に変化が生じる傾向も概ね一致している。

図-3.14(3)に水位差 0.2 m でコンテナの配置を 90°としたケースにおける実験結果と解析結果との漂流軌跡の比較を示す。実験における水位差 0.2 m のケースは、0.3 m のケースと比較して、斜面への遡上距離が短く、その一方で引き波時に押し戻される距離が長い。そして、ほぼ初期設置位置付近で座礁する。解析結果においても、0.3 m のケースと同様に概ね座礁位置や遡上する距離は一致している。以上から、コンテナを単独に配置した時の、段波によりコンテナが斜面を遡上する状況、および座礁位置に関する本漂流シミュレーションの適用性が確認されたと考えられる。

#### (5) 漂流物の挙動解析による実験再現結果（コンテナ 2 個同時配置）

図-3.15にコンテナを2つ並列に配置したケースにおける実験結果と解析結果との漂流軌跡の比較を示す。実験における A コンテナ（陸地中央に設置）は、B コンテナ（内陸側に設置）と衝突し、陸地法尻部付近にて停滞し、その後、引き波の影響により沖側まで移動する。一方の B コンテナは、A コンテナとの接触の影響により斜面を遡上し、引き波時に移動しないでその場に座礁する。解析における A コンテナは、B コンテナと接触後も斜面を遡上し、引き波時に沖側まで移動し、座礁位置は実験結果と概ね一致している。一方の B コンテナも同様に、A コンテナとの接触後に斜面を遡上するものの、遡上距離は実験結果よりも長い。そして、引き波時には、斜面上に座礁する。B コンテナについては、実験結果と解析結果との整合がやや低い結果を示している。実験結果との整合が低くなった原因には、コンテナの影響による反射波の増加や、コンテナ同士が衝突した際に流速場へ生じる影響によるものと考えられる。2つのコンテナを同時に配置した場合は、B コンテナの軌跡についてはやや実験結果の再現性が低いものの、実用的には十分な精度を有すると考えられる。よって複数のコンテナ同士の衝突や座礁位置についても、概ね本漂流シミュレーションの適用性を確認できたものと考えられる。

以上のことから、本研究で構築した漂流物の挙動解析手法は、水理模型実験の再現計算によりその妥当性を十分に確認したと結論付けられる。

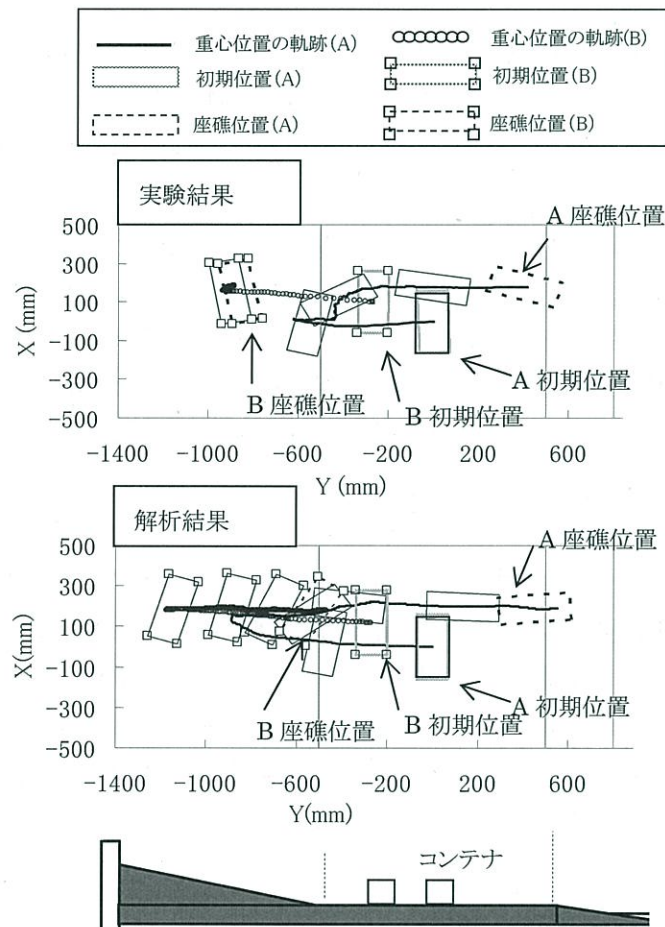


図-3.15 漂流軌跡の比較（コンテナ 2 個並列配置）

#### (6) 漂流物の挙動解析による実験再現結果（自動車）

図-3.16 に自動車を単独で配置した場合における，漂流軌跡の実験結果と解析結果の比較図を示す．なお，実験における自動車模型は，縮尺に合わせて質量調整を行い，内部浸水を防ぐため外周を密閉した上で用いた．また，解析における重心位置は模型の重心位置に合わせて設定した．

自動車をを用いた実験結果では，コンテナを用いた結果と比較して段波に対する移動量が全体的に少ない．これはタイヤの存在により，段波作用初期の流体力（自動車底面の受流面積は小さい）が小さいので，移動開始に遅れが生じるためである．ややばらつきは見られるものの，両者は概ね一致する結果を示しており，自動車を対象とした場合についても解析手法の良好な妥当性が伺える．



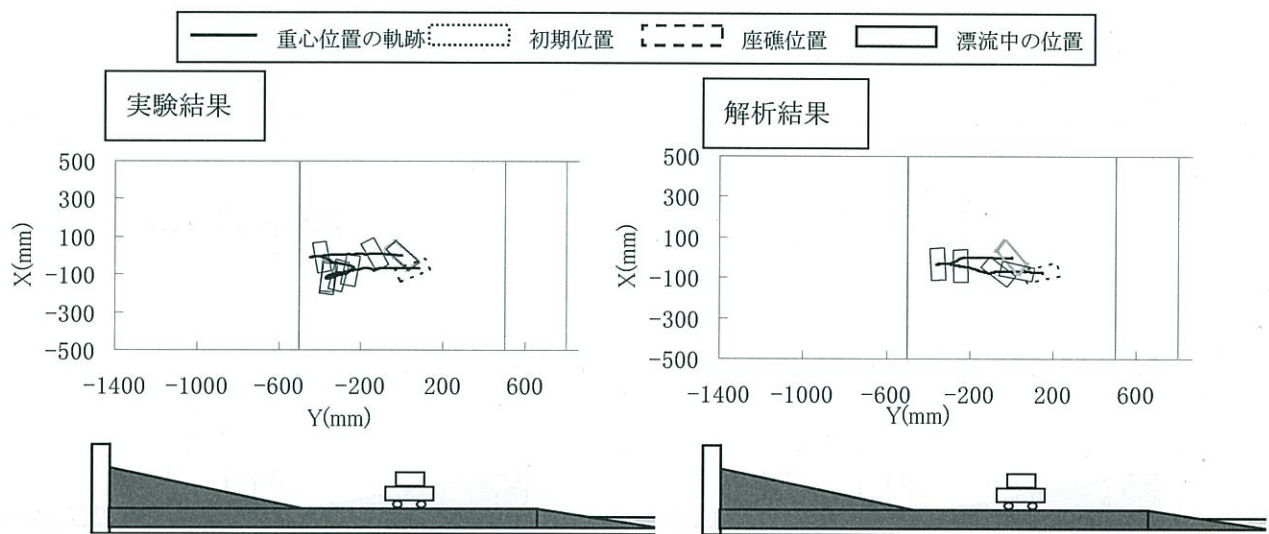


図-3.16(1) 漂流軌跡の比較(設置角  $45^\circ$  , 水位差 0.2 m)

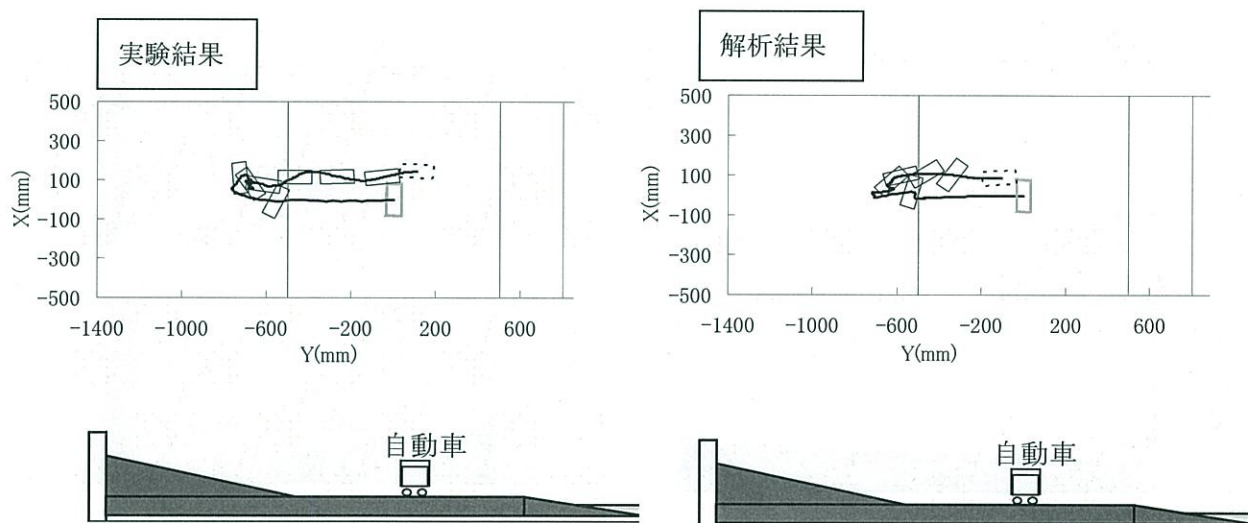


図-3.16(2) 漂流軌跡の比較(設置角  $90^\circ$  , 水位差 0.2 m)

図-3.17に自動車を2台同時に配置した場合における漂流軌跡の実験結果と解析結果の比較を示す。実験結果では、押波時に2台の自動車は衝突し、引波時にはほぼ初期位置に近い場所に2台とも座礁した。一方、解析結果では、自動車Bは押波時の遡上距離が実験結果よりも大きくなり、回転現象についても実験結果とやや異なる傾向を示している。しかしながら、座礁位置については概ね実験結果を再現できていると考えられる。再現性が低い要因としては、外力の再現精度、特にX方向（短軸方向）流速、および反射波などの影響と考えられる。



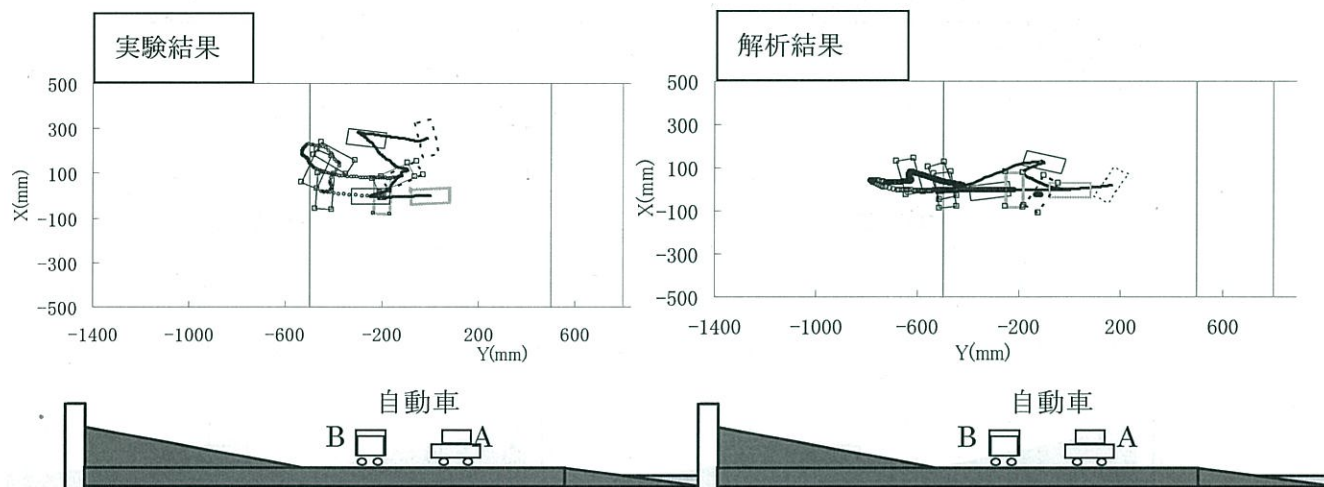
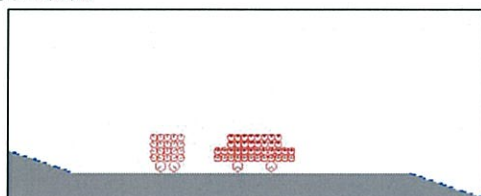
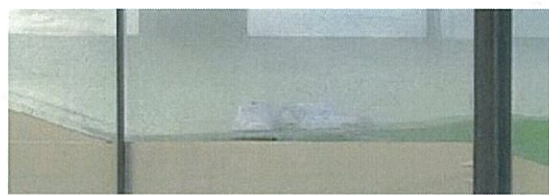
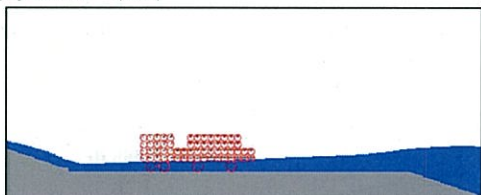


図-3.17 漂流軌跡の比較(自動車 2 台同時配置, 水位差 0.2 m, 直角)

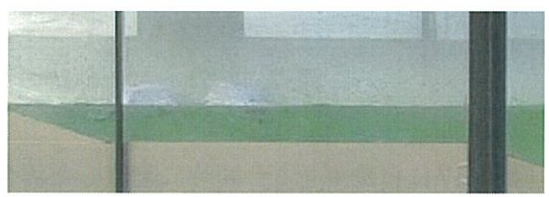
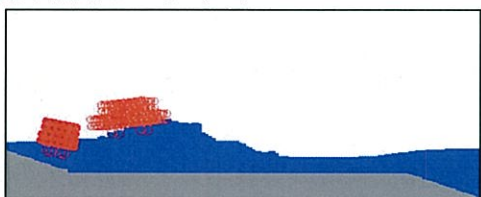
①実験前



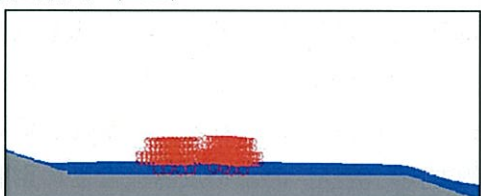
②浸水時 (3S)



③反射波発生時 (5S)



④座礁時 (10S)



解析結果

実験結果

図-3.18 実験と解析の静止画の比較 (自動車 2 個同時配置)

### (7) 漂流距離の比較

図-3.19 にコンテナと自動車について段波によって漂流した距離を実験と解析結果を比較した結果を示す。なお、図のプロットは津波ゲートを解放してから反射波が到達するまでの約 15s 間にコンテナ、自動車が移動した距離を整理した結果である。図-3.19 から、解析結果の方が実験結果よりも漂流する距離はやや短いものの両者は概ね一致する傾向を示しており、本手法の妥当性が認められる。解析結果の方がやや漂流距離が短くなる要因は、流速場の再現計算において解析結果の方が実験結果よりも流速がやや小さい（例えば、図-3.12(2)）傾向を示した点などが考えられる。

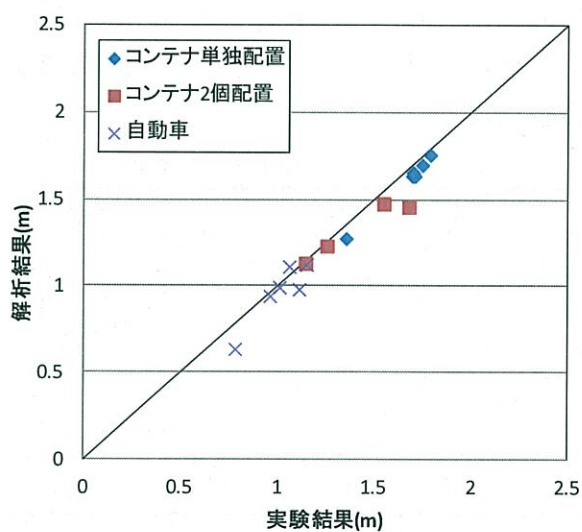


図-3.19 実験と解析結果の漂流距離の比較

### 3.3 船舶漂流による被害の評価 ～気仙沼大川北部を対象にして～

#### 3.3.1 対象船舶の設定

次に、気仙沼市大川北部地点を対象とした漂流物被害の評価を行う。気仙沼市は、まぐろはえなわ漁業や、さんま・かつお等の沿岸漁業の水揚げ地として有名であり、数多くの漁船が往来している<sup>8)</sup>。そこで、漂流物被害の評価においては、小型船舶（漁船、排水量 $3\text{m}^3$ ）を対象に設定することし、気仙沼海域に複数隻同時に配置した状態で、津波来襲前後120分間の漂流計算を行う。漁船の浮遊特性は、縮尺1/15の抗力実験の結果から得られた流向毎の値（図-3.9）を用いる。なお、実際の被害評価においては漂流物の種類や初期位置に加え、津波の時刻歴データ自体の不確定性などについて考慮する必要があるが本研究においては初期位置の不確定性は考慮しないこととしている。表-3.7に船舶の諸元を示す。図-3.20に船舶の初期配置を示す。

表-3.7 船舶（漁船）の諸元

諸元	数値	単位
長さ	6.0	m
高さ	2.0	
幅	2.0	
排水量	3.0	$\text{m}^3$

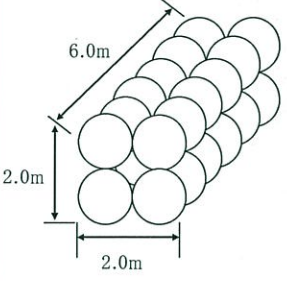
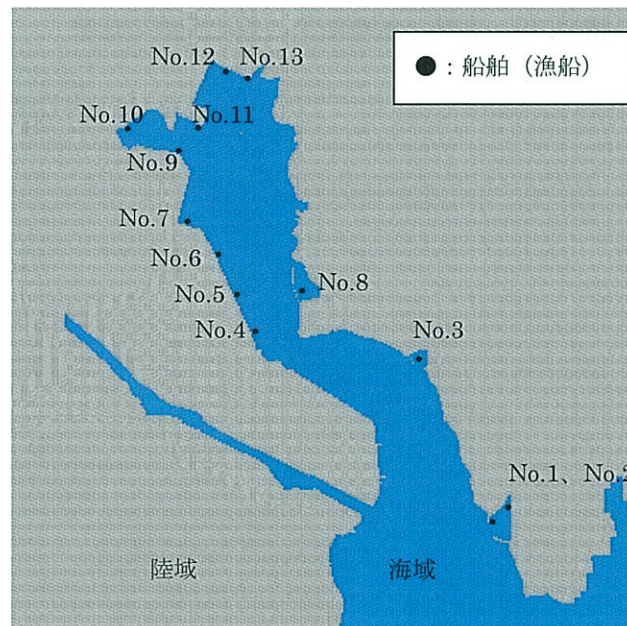



図-3.20 船舶（漁船）の初期配置



解析における船舶の初期位置は、現地の実情を踏まえた上で各係留施設前面への13隻配置とする。気仙沼の係留位置の特徴としては、3つの小さな漁業用の避難・係留地点(図-3.20中のNo.1～3, およびNo.8), 魚市場前面の係留施設(No.4～No.7), レジャー等のその他の用途のための係留施設(No.9以降)である。検討では、乱数を変化させた50ケースの計算をそれぞれ実施し、漂流する船舶の挙動のばらつきを考慮する。

### 3.3.2 船舶漂流による被害評価 (L1 地震津波, L2 地震津波)

#### (1) L1 地震津波に対する被害

図-3.20にL1地震津波に対する船舶の初期位置と漂流軌跡の一例を示す。船舶の軌跡の一例からは以下の傾向が見られる。

No.1～No.3の港内にあるものは比較的少ない挙動を示しており、津波による被害が少ない傾向が見られる。No.4～No.9の魚市場付近では、津波の押引により護岸前面を漂流する傾向を示している。湾外よりのNo.4のみが護岸を乗り越え魚市場付近にて座礁する結果を示している。蜂ヶ崎背後のNo.8については、引波の影響を強く受けて港外への流出が発生している。湾奥のNo.10以降については、押波の影響により都市部に乗り上げて座礁する傾向を示している。

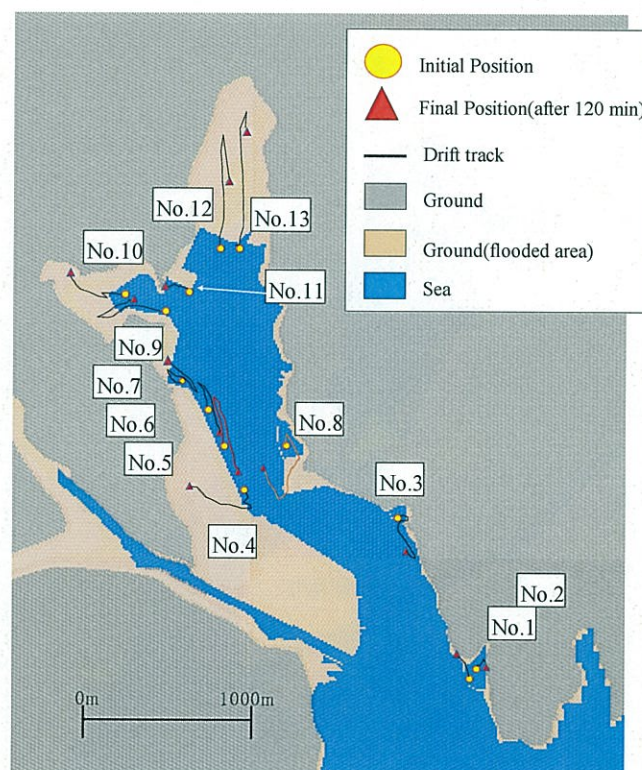


図-3.20 船舶の漂流軌跡例 (乱数なし, L1 地震津波)

乱数を変化させた 50 ケースの計算結果から各船舶の漂着を示す船舶漂流危険マップを作成する。図-3.21 に L1 津波に対する船舶漂流危険マップの整理結果を示す。なお、危険エリアの決定においては、地震発生後から 110～120 分間における船舶の位置を対象にすることと定義し、津波伝播計算を実施した 12.5 m の正方格子単位でカウントして整理する。また、危険度の強弱の目安を示すため、頻度 0.1 以下とそれ以上の値とに区別する(50 回の計算のうち 5 回以上通過した地点を頻度 0.1 以上と定義)。なお、地点によっては解析 1 ケースの中で複数の船舶が存在する場合もあったが、本検討においては船舶数の違いは考慮しない。

大浦地区以南の湾内にある船舶については、不確定性を考慮した解析結果においても同様に、多少の護岸構造等への衝突が見られるものの殆ど湾内で滞在する傾向である。魚市場付近の船舶群は、概ね蜂ヶ崎と魚市場の中間海域に集積する傾向を示している。こちらの方は船舶漂流エリアが比較的広い範囲に及んでおり、不確定性によるばらつきが大きい。その要因としては、当該海域が狭い水道を形成しているために、局所的に速い流速が発生し、その結果、船舶漂流エリアの広範囲化に繋がっていると思われる。いずれにせよ、魚市場付近の船舶は、流出被害が卓越する。錦町付近は殆どが内部への座礁被害が卓越する傾向を示している。

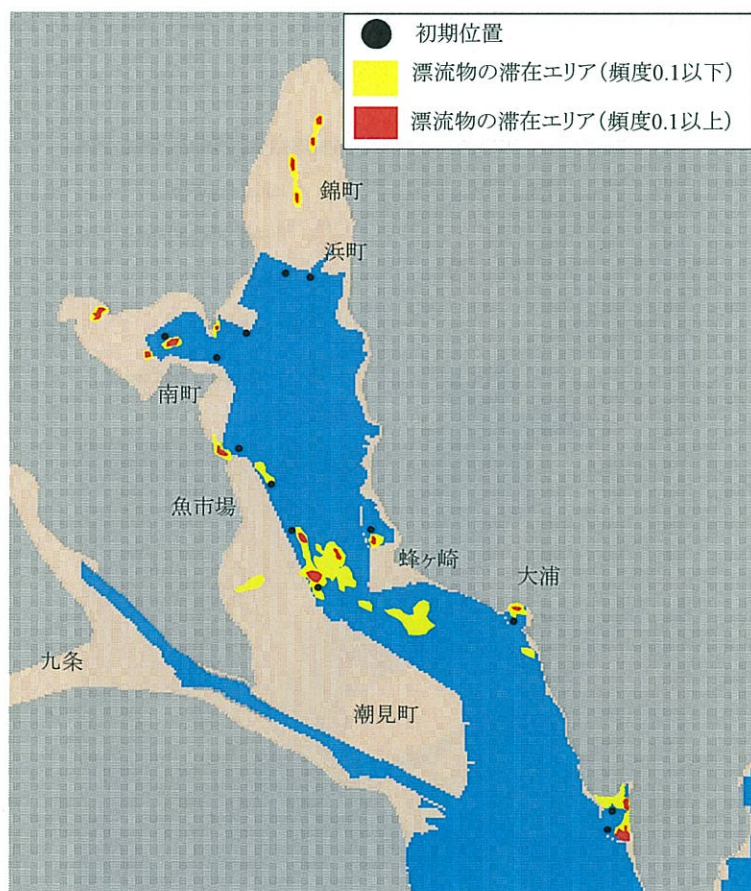


図-3.21 船舶漂流危険マップの評価結果 (L1 地震津波)



次に、船舶が護岸等の構造物に衝突した地点を整理した結果を図-3.22に示す。計算においては、漂流時に隣のグリッド側面と接触したメッシュを衝突位置とみなし、衝突確率の定義は、ケース当たりの衝突頻度を解析ケース数で除する。

図より、魚市場から潮見町にかけての護岸全体への船舶の衝突が際立っている。また、蜂ヶ崎、および大浦付近の漁業用の退避・係留施設付近においても同様に広く分布している。一方、南町から錦町にかけては、殆ど衝突した形跡が見られない。

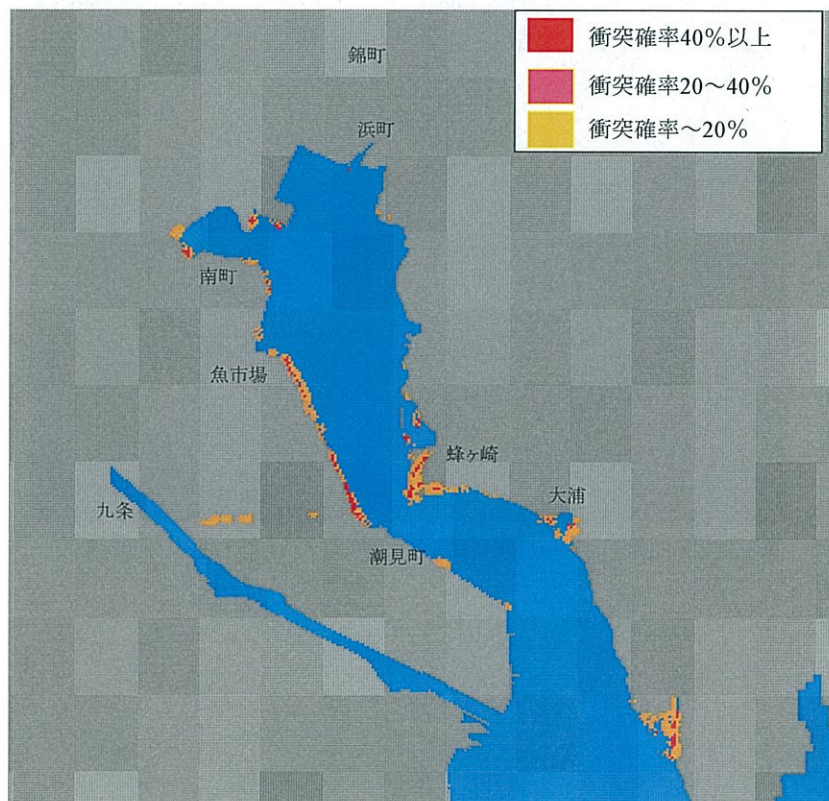


図-3.22 構造物への船舶衝突位置の試算結果 (L1地震津波)

最後に衝突力の最大値を位置毎に整理した結果を図-3.23に示す。ここでは、衝突力が1 kNに満たない値は除き、50ケースの計算における最大衝突力を整理する。図より蜂ヶ崎付近と潮見町前護岸位置での衝突力が大きくなる(100 kN以上)結果を示している。これは、1波から2波目の比較的高い津波来襲時に衝突に至る傾向を示しているために衝突力が大きくなったものである。また、湾奥の地点における衝突力は極めて小さい傾向を示している。同様に3波目以降で衝突に至る場合が多いことによるものと考えられる。

以上から、気仙沼大川北部地点でのL1地震津波に対する船舶漂流による被害(漂着位置、護岸等の既設構造物への衝突力)を定量的に評価する。



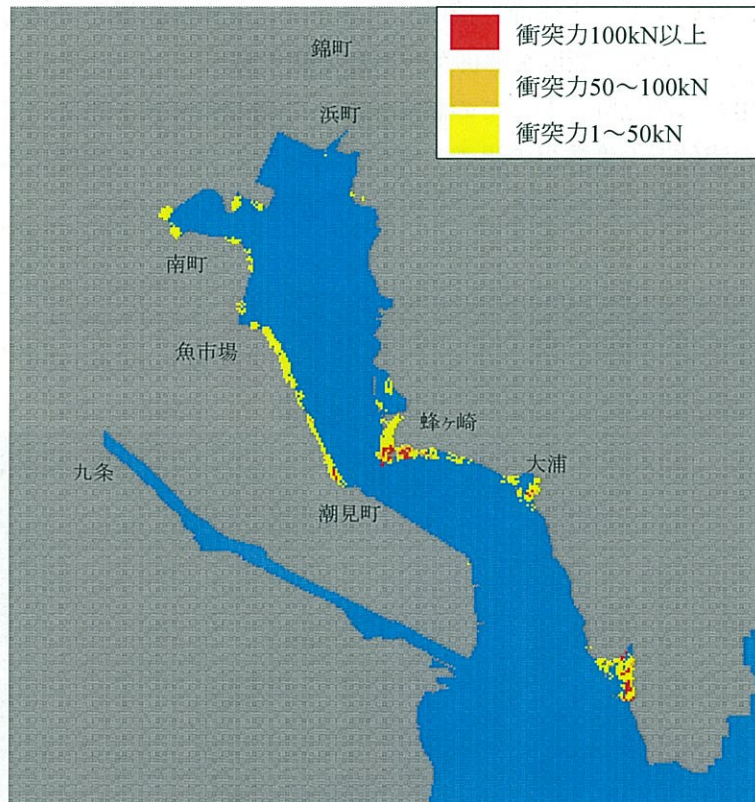


図-3.23 構造物への船舶最大衝突力の分布 (L1 地震津波)

## (2) L2 地震津波に対する被害

図-3.24 に L2 地震津波に対する船舶の初期位置と船舶漂流軌跡の一例を示す。船舶漂流の軌跡の一例からは以下の傾向が見られる。

No. 1～No. 3 の港内にある船舶は L1 地震津波のケースで比較的少ない挙動であったものが、すべて概ね港外に流出する結果を示している。No. 4～No. 9 の魚市場付近では、津波の押引により複雑な挙動を示しており、陸上へ遡上するものと湾内に漂流する場合に分かれる傾向を示している。また、陸上内部への船舶漂流距離は L1 地震津波のケースに比較して大幅に増加している。湾奥部の No. 9 以降については、定性的な挙動は L1 地震津波とほぼ同じ傾向であるものの、船舶の座礁位置は浸水範囲に対応して内地地寄りに移行している。全体的には、L1 地震津波のケースの約 2 倍以上の距離を漂流する結果である。L2 地震津波のケースにおいては、陸地へ遡上した場合には、その漂流距離が大きくなることわかる。

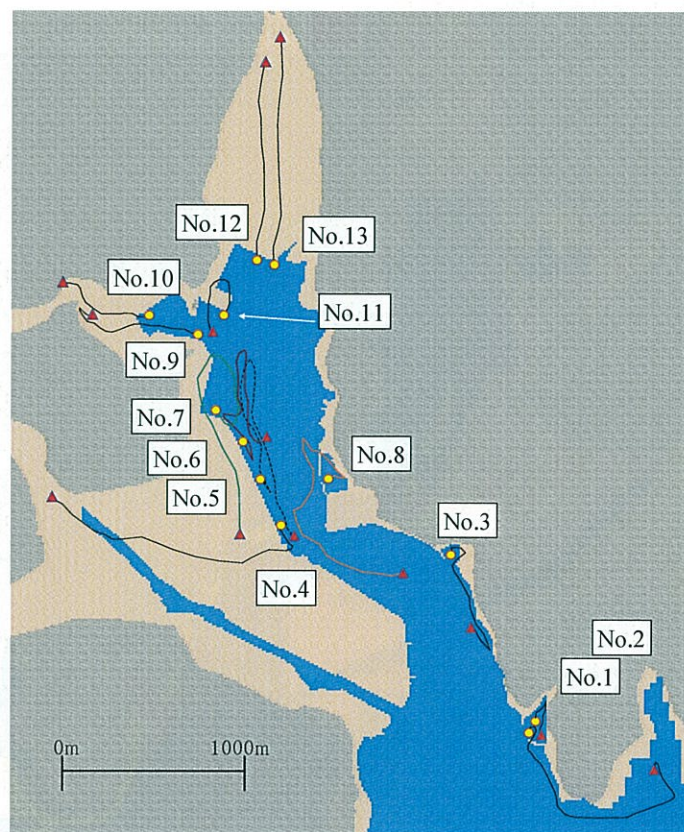


図-3.24 船舶漂流の軌跡例（乱数なし，L2 地震津波）



乱数を変化させた 50 ケースの計算結果から各船舶の漂着を示す船舶漂流危険マップを作成する。図-3. 25 に L2 地震津波に対する船舶漂流危険マップの整理結果を示す。なお、危険エリアの決定においては、L1 地震津波のケースと同様に行う。

L2 津波では、L1 地震津波のケースにおいて海域に広く分布していたエリアは少なくなり、潮見町から魚市場に至る内陸部での漂流エリアを構成している。また、一部は魚市場を通り抜け九条付近にまで横断する場合もある。どちらかといえば流入被害の方が卓越すると見受けられる。また、湾奥部については、津波レベルの違いによる差があまり見られず、船舶漂流エリアも他の区域と異なり狭範囲な傾向に収まっている。いずれの船舶についても内陸部に漂流する結果を示している。以上より、この海域にある船舶は、津波レベルの違いに関わらず一律的に流入被害が発生する傾向が見られる。

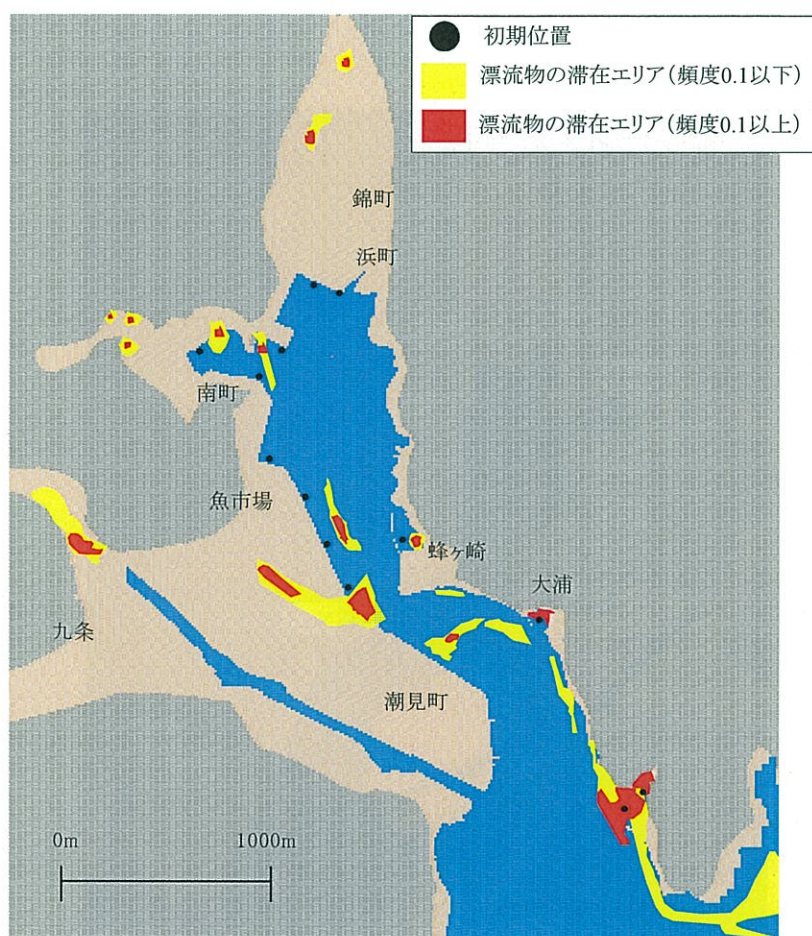


図-3. 25 船舶漂流危険マップの評価結果 (L2 地震津波)



次に、船舶が護岸等の構造物に衝突した地点を整理した結果を図-3.26に示す。計算においては、船舶漂流時に隣のグリッド側面と接触したメッシュを衝突位置とみなし、衝突確率の定義は、ケース当たりの衝突頻度を解析ケース数で除した値と定義する。図より、L1地震津波のケースよりも衝突するエリアが小さくなる傾向がわかる。特に、L1地震津波では魚市場から潮見町にかけての護岸全体への衝突が際立っている一方で、L2地震津波においては殆ど衝突が発生していない。また、潮見町、南町等の陸上エリアでの衝突が増加している。L2地震津波では、津波の来襲により陸地への遡上被害が卓越する傾向を示すために、衝突位置が内地寄りに移行したものと考えられる。陸地での衝突被害は南町西側付近で目立っている。ただし、陸地への遡上による衝突の有無は、船舶漂流危険マップの分布と比較して全体的に発生エリアが狭い。その要因は、本検討では、衝突の定義をグリッド側面との接触を衝突と定義した上で実施しており、座礁時にグリッド底面と接触した時に発生した応力はカウントしていないためと思われる。

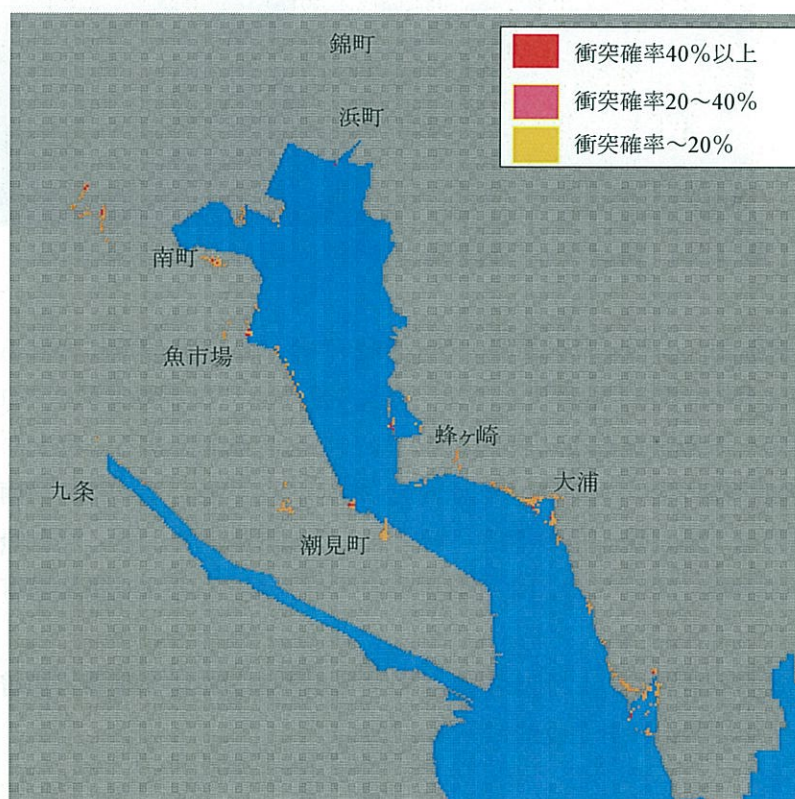


図-3.26 構造物への船舶衝突位置の試算結果 (L2地震津波)

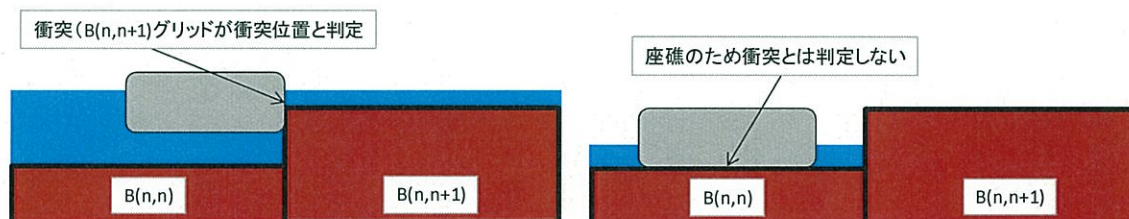


図-3.27 衝突の判定イメージ

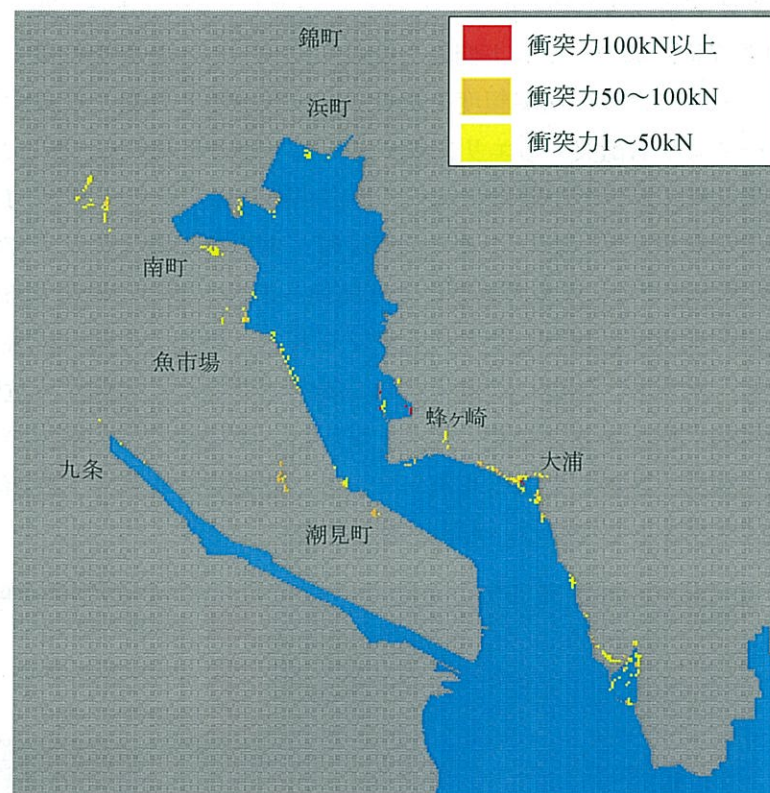


図-3.27 構造物への船舶最大衝突力の分布 (L2 地震津波)

図-3.27 に構造物への船舶最大衝突力の分布を示す。L2 地震津波における構造物への衝突力の最大値は全体的に L1 地震津波のケースよりも小さくなる傾向が見られる。また、水際付近の護岸等への衝突があまり発生していない点も特徴的である。遡上による陸地への衝突は、L1 地震津波よりかは増加する傾向をやや示している。その傾向は南町西側で顕著である。衝突力は、蜂ヶ崎背後の湾内、潮見町付近の内陸部で大きくなる傾向を示している。全体的に L2 津波においては、L1 地震津波のケースよりもあまり衝突被害が生じない傾向が伺える。

以上から、気仙沼地点での L2 地震津波に対する船舶漂流による被害（漂着位置、護岸等の既設構造物への衝突力）を定量的に評価した。



### 3.4 結論

本章では、津波被害予測における船舶の漂流による流出・衝突被害の評価手法について述べた。新たに構築した解析手法は以下となった。①あらかじめ別手法により解析した津波水位・流速を外力条件とする。②障害物との接触は個別要素法に基づき、船舶などの漂流物は複数の球要素からなる複合体としてモデル化を行う。③抗力実験結果に基づいた津波の流向による抗力変化をモデルに組み込むことで船舶の漂流特性を考慮する。④正規分布関数に基づく拡散項を導入した津波流体力の不確定性を確率的に評価する。構築した解析手法は、津波に対する船舶漂流軌跡や座礁位置などについての水理模型実験結果の再現計算により、妥当性の確認を行った。

構築した手法を用いて、気仙沼大川北部地点を対象とした船舶漂流挙動の予測計算を行い、船舶漂流による被害特性について詳細な考察を述べた。気仙沼地点では、L1 地震津波に対しては流出被害が発生する傾向が強く出ており、一方で L2 地震津波では流入被害が顕著であった。構造物への衝突の発生やその応力最大値は、水際付近の位置で大きくなる結果を示すことがわかった。



## 参考文献

- [1] 藤井直樹, 大森政則, 池谷毅, 朝倉良介, 入谷剛, 柳沢賢 : 津波による漂流物の移動に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 21 巻, pp.127-132, 2005.
- [2] 目黒公郎, 伯野元彦 : 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究所彙報, vol.63, 東京大学地震研究所, pp.409-468, 1988.
- [3] 後藤仁志, 五十里洋行, 殿最浩司, 柴田卓詞, 原田知弥, 溝江敦基 : 粒子法によるエプロン上のコンテナ漂流挙動追跡シミュレーション, 海岸工学論文集, 第 56 巻, pp.261-265, 2009.
- [4] 後藤智明, 佐々木順次, 首藤伸夫 : 津波による木材の挙動, 海岸工学論文集, 第 29 巻, pp.491-495, 1982.
- [5] 水谷法美, 廉慶善, 宇佐美敦浩, 中村友昭, 白石和睦 : 陸上津波によるコンテナの漂流と漂流衝突力に関する研究, 第20回海洋工学シンポジウム, 日本海洋工学会・日本船舶海洋工学会, 312p., 2008.
- [6] 日本機械学会 : 機械工学便覧, p.80, 2006.
- [7] 財) 沿岸技術研究センター : CADMAS-SURF 実務計算事例集－数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書－, 沿岸技術ライブラリー, No. 30, p.306, 2008.
- [8] 気仙沼漁業組合 HP <http://www.kesennuma-gyokyou.or.jp/index.html>.

## 第4章 人的被害の評価

本章では、津波被害予測の中における人の避難行動における被害予測に関して記述する。冒頭では構築した解析コードについて述べるとともに、人の避難行動特性に関する水理実験結果等に基づく解析コードの実現性を図る。次に、気仙沼大川北部地点を対象とした人的被害予測計算を行い、人的被害特性について詳細な考察を述べる。

### 4.1 人の避難行動解析手法の概要

#### 4.1.1 避難行動ポテンシャルモデル

本研究における避難シミュレーションの基礎は瀧本ら(1996)の手法に基づく。その手法の概要は次の通りである。まず検討区域周辺の地形を再現するために国土地理院の GIS データを用いて道路や河川・公共施設といった地形データを取得する。それらの情報のうち道路データはその道路幅の情報を持つ格子と線で構成されるノード・リンクモデルとして単純化し、避難経路として表現する。なお、ノードは道路と道路の交差点を、リンクはノード間の道路を表している。図-4.1 にリンク・ノードの概念を示す。避難者は、ノード・リンクを経由して避難を行う。避難者はあるノードから次のノードへ移動する時、式(4.1)に定義されたポテンシャル値が最小となるノードへ移動するようなリンクを選択する（避難所を知っている場合）。なお、このポテンシャルは避難場所でマイナス無限大となり、浸水したノードは0とする。

$$\Omega = -\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} \quad (4.1)$$

ここで、 $\Omega$  はポテンシャル値、 $R_k$  は避難者の位置から $k$ 番目の避難所までの距離、 $n$  は避難場所の数をそれぞれ示している。

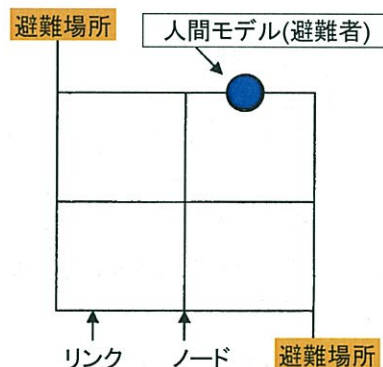


図-4.1 リンク・ノードモデルの概念

#### 4.1.2 避難速度・避難可否条件

本研究では、歩行による避難と車による避難との2つの避難方法を想定した解析手法の構築を行うこととする。

##### (1) 歩行による避難の場合

歩行避難において重要なのは、避難する速度およびどの状態で被災と判断するかである。特徴は、津波による避難は比較的長距離にわたり、また、東日本大震災でも実際にあったように黙々と歩行する人が非常に多い点である。また、お互いが寄り添うように、情報交換を行いながら避難する点などがあげられる。浸水していない時の避難者の歩行速度は津波対策推進マニュアル<sup>2)</sup>に準拠することとし、表-4.1に示した値とする。表-4.1は、北海道南西沖地震において実際に避難した人が避難所までに要した時間を元に算出した数値であり、極めて現実的な数値と考えられる。

表-4.1 非浸水時の年齢別の避難行動速度<sup>2)</sup>

年齢	非浸水時 歩行速度 ( $V_a$ (m/s))
～19	0.87
20～29	0.87
30～39	1.47
40～49	1.03
50～59	0.68
60～	0.58

避難者が津波により浸水した場合における歩行速度の低下（避難がしにくくなる状態）は以下に示す通りに設定する。式(4.2)及び(4.3)に浸水時の歩行速度  $v(u, h)$  を示す。

$$v(u, h) = \min \left( \sqrt{\frac{0.9330 - 2.176A^{3/2}}{aA}} - u, V_a \right) \quad (4.2)$$

ここに、 $u$  は流速(m/s)、 $h$  は水深(m)、 $a$  は安全率、 $V_a$  は非浸水時の歩行速度(m/s)、をそれぞれ示している。式(4.2)の  $A$  は人体が抗力を受ける面積であり、水深の関数として式(4.3)で与える。

$$A(h) = -0.1756h^3 + 0.5173h^2 - 0.0375h \quad (4.3)$$



最後に、浸水後やがて力尽き被災者（避難不能）となる条件は以下の式で与える。

$$v(u, h) > 0.4 \quad \text{or} \quad h \geq 0.7 \quad (4.4)$$

なお、上記の条件設定は、五洋建設(株)技術研究所にて実施した人の歩行実験<sup>3)</sup>の結果を元に設定した値である。

## (2) 車両による避難の場合

東日本大震災においては、約半数の人が車による避難を試みたことを踏まえて、本研究では、車両避難による手法も合わせて構築し、避難種別毎の人的被害の想定を行う。車両移動における特徴は、車道幅などの影響により速度が随時大きく変化する、渋滞・ボトルネックが発生する点である。そこで、道路上を走行する車列について、車間距離を参照して1台1台の車の加速度が決められる運動方程式で記述するモデル<sup>4)</sup>を用いる。運動方程式は以下となる。

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = a \left\{ V(\Delta x_i) - \frac{dx_i}{dt} \right\} \quad (4.5)$$

ここで、 $V(\Delta x_i)$ は最適速度関数、 $x_i(t)$ は時間 $t$ における車 $i$ の位置、 $\Delta x_i = x_{i+1}(t) - x_i(t)$ は時間 $t$ における車間距離、 $a$ は感度である。

また、最適速度関数は、

$$V(\Delta x_i) = \frac{v_{\max}}{2} [\tanh(\Delta x_i - x_L - x_c) + \tanh(x_c)] \quad (4.6)$$

で示されている。ここで、 $v_{\max}$ は車の最高速度、 $x_c$ は安全距離、 $x_L$ は車長さである。ここで、感度はパラスタ（初期検討）することで設定した。感度は値が大きい程、運転者の加減速が早く切り替わり、小さいと鈍くなることを意味している。

表-4.2 初期検討の設定

安全距離	$x_c$	15m
最高速度	$v_{\max}$	20m/s (=72km/h)
台数		50
初期車間距離		30m
初期速度		20m/s
時間刻み	dt	0.1s
計算時間		120s
感度	$a$	0.5, 1.0

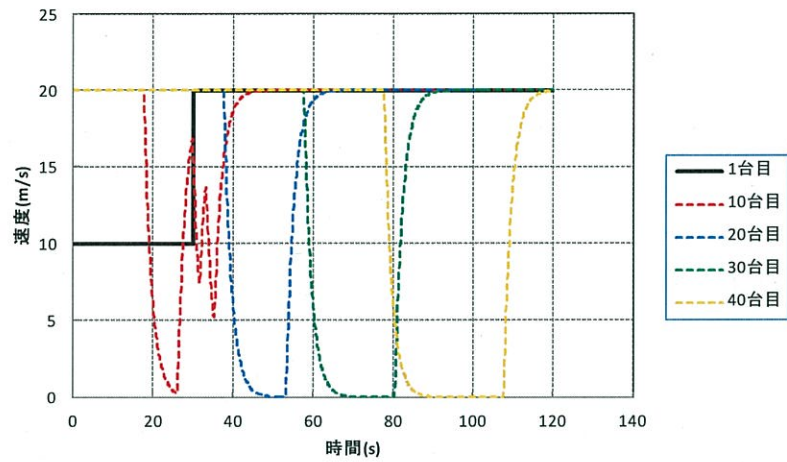


図-4.2(1) 車の移動速度の計算結果 ( $\alpha=0.5$ )

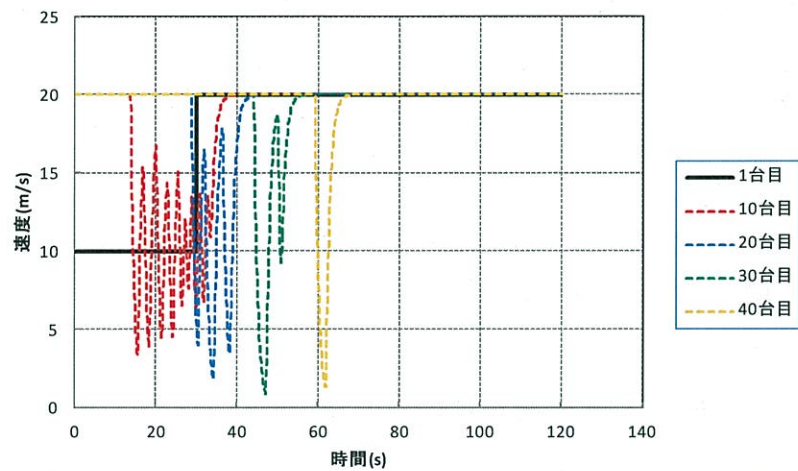


図-4.2(2) 車の移動速度の計算結果 ( $\alpha=1.0$ )

図-4.2は40台の車を走行させて、先頭車両が速度変化を行った時の後続車への影響を確認した結果である。感度が1.0においてはやや計算結果の不安定性が生じており、0.5では渋滞の構成が明確に表れている。パラスタ検討から本研究では、感度を0.5と設定することにする。また、以降の解析における最高速度は法定速度とし、車道幅をもとに各避難路の法定速度を区間毎に考慮する。

最後に、浸水後の避難不能となる水深 $h$ の条件は以下の式で与える。車避難における限界値は、馬場ら<sup>5)</sup>に基づき以下の設定とする。

$$h \geq 0.7 \quad (4.7)$$

### 4.1.3 地震動での道路閉塞による影響

津波に対する避難行動においては、津波来襲前の地震動により避難路が塞がり避難路として活用できることが容易に想像される。例えば、兵庫県南部地震においては、多くの建物が倒壊して散乱し、その結果、避難経路が極端に少なくなったケースも生じた。

そこで、本研究では人的被害の評価における現実性をより深めるために、直接的な地震動による街路閉塞を考慮するモデルを導入する。街路閉塞の発生を考慮する瓦礫の分布幅を確率モデルとして表現できる赤倉ら<sup>9)</sup>のモデルを拡張した田村ら<sup>7)</sup>の手法を用いて、避難行動解析に確率的に評価する。赤倉らは高橋ら<sup>8)</sup>の街路閉塞予測モデルを元にして街路リンクにおける瓦礫幅の最大値の確率分布モデルを表-4.3のように導出している。

表-4.3 街路リンクの瓦礫幅確率分布

震度	$\mu_l$	$\sigma_l$
5	0m	0m
6	-0.82m	1.57m
7	1.27m	3.14m

赤倉らはさらに、街路沿道の個々の建物の瓦礫幅の確率分布モデルを提案している。同モデルは、まず街路リンクを構成する建築物の数を  $n$  として、仮想街路幅員  $w'$  を式(4.8)のように求める。ここに、 $w$  は街路幅、 $w'$  は瓦礫散乱後の街路幅、 $\Phi$  は標準正規分布関数、 $\mu_l$  は平均値、 $\sigma_l$  は標準偏差をそれぞれ示している。

$$w' = \Phi^{-1} \left\{ \left[ \Phi \left( \frac{w - 3.0 - \mu_l}{\sigma_l} \right) \right]^{1/n} \right\} \sigma_l + \mu_l + 3.0 \quad (4.8)$$

個々の建物の瓦礫幅確率分布は、表-4.3 に示される瓦礫幅の確率分布形状の平均値を( $w - w'$ )だけ平行移動させた分布形状となる。個々の建物の通行可能率が得られる結果、個々の建物による通行可能率を  $R$ 、街路リンクにおける通行可能率を  $R_s$  とすると、街路リンクを構成する建物数  $n$  を用いて、式(4.9)が適用できる。

$$R_s = R^n \quad (4.9)$$

街路リンクの通行可能率は兵庫県南部地震の街路閉塞を最も適切に再現できるモデルとして求められたものであり、街路延長や建物数についてはモデルのパラメータとして考慮



されていない。そこで以下のような仮定のもと、街路延長を考慮するためのモデル化を行う。赤倉らのモデルで考慮した兵庫県南部地震における事例は平均的な街路長を代表するモデルと考えられる。ここでは、平均的な街路条件として  $n=4$  と想定し、赤倉らのモデルから得られる個々の建物の瓦礫幅の確率分布を、任意長さの街路に対する閉塞率の算定に使用する個々の建物による瓦礫幅確率分布とする。街路延長が異なる街路の閉塞率  $B_s$  は以下となる。

$$B_s = 1 - (1 - R_{n=4})^n \quad (4.10)$$

ここに、 $R_{n=4}$  は建物数  $n$  を 4 と想定した際の個々の建物の瓦礫確率分布から求まる個々の建物による通行可能率である。また、避難者の通行に支障となる街路閉塞確率を算定することが必要であるが、街路幅員と避難可能性判定の関連性が把握できる研究事例等はないため、本研究では、歩行・車ともに 1.5m 以上の幅員が残っている場合には、通行可能と暫定的に設定する。図-4.3 に瓦礫幅による街路閉塞のイメージを示す。

#### ○瓦礫幅確率分布モデル(街路閉塞)

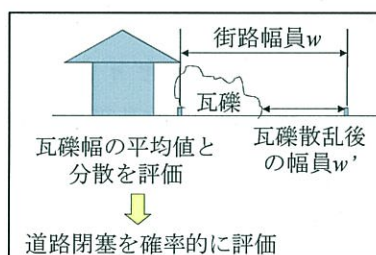


図-4.3 街路閉塞のイメージ図

## 4.2 人的被害の評価 ～気仙沼大川北部を対象として～

### 4.2.1 避難モデルの設定

図-4.4 に気仙沼大川北部地点を対象とした検討における避難者（徒歩避難，車両避難）（以降，避難対象者）の初期位置および避難所を示す．なお，避難対象者の初期分布は当該地の地区毎の住民台帳（非公開資料）を参考に，現実に沿った重み付けを行った上設定している．避難対象者は，リンク・ノードを経由して避難所（高台）に向けて逃げることとなる．

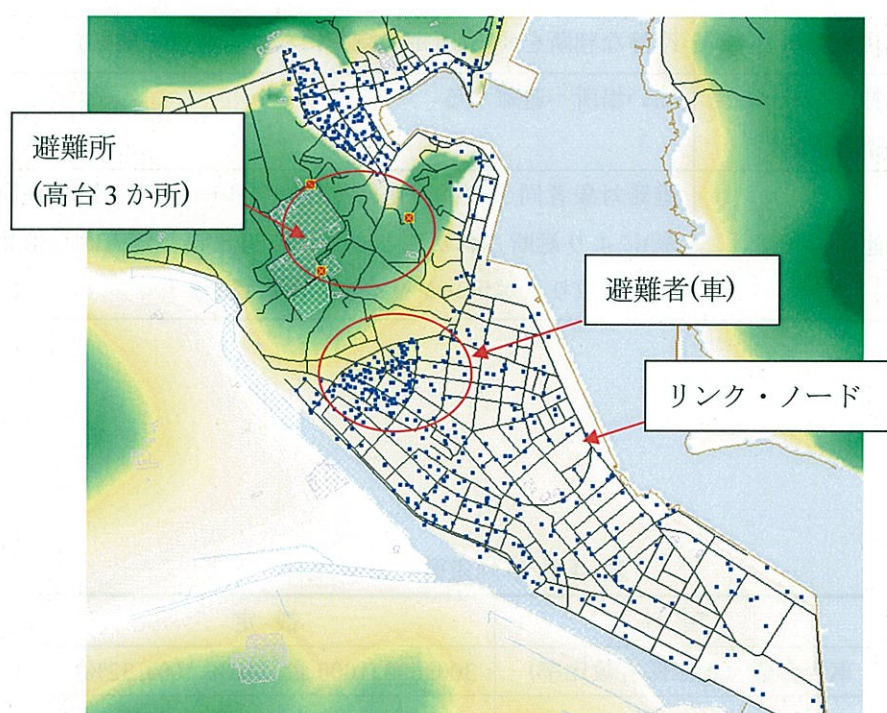


図-4.4 避難者初期位置(600 人)および避難所(気仙沼大川北部)

なお，本研究においては，避難対象者および避難行動を開始する時間を変化させた解析により，津波に対して避難困難となる時間的・空間的傾向を把握することで人的被害の評価を行う．表-4.4 および 表-4.5 に避難対象者の解析条件を示す．

表-4.4 徒歩避難の解析条件

項 目	内 容
避難者数	1000 人
避難所数	3 箇所（高台）
避難場所	知っている（最も近い避難所へのルートを選択）
災害状況に対して	冷静な判断をする(所定の時刻になれば避難を開始)
行動特性（ルート浸水の緊急措置）	高い場所へ避難する
その他	避難対象者同士の情報連絡を行う（ルートが浸水(街路閉塞)により遮断されたことを受けて引き返した人から情報を受け取り，ポテンシャルを即座に更新）

表-4.5 車両避難の解析条件

項 目	設 定
車両台数（地区保有数比率）	300, 600, 1000 台（10%, 19%, 32%）
避難所数	3 箇所（高台）
避難開始時間	0 分-60 分まで 2 分毎, 一斉避難
感度 / 時間刻み	0.5 / 0.01s
車長 / 安全距離	4.7m（小型自動車） / 15m
一時停止/方向転換時間	3s / 120s
最高速度	道路幅 ～1.5m：車両通行なし 道路幅 1.5～3.0m：30km/h 道路幅 3.0～5.5m：40km/h 道路幅 5.5～：60km/h



#### 4.2.2 人的被害の評価（L1 地震津波, L2 地震津波）

##### (1) 徒歩避難の場合

図-4.5 に徒歩避難の場合を対象とした解析結果を示す。図は、地震発生後ある一定の時間が経過後に避難者が一斉に避難を開始（避難開始時間）し、津波に対して避難が完了可能か（避難成功率）をシミュレートした結果を示したものである。なお、解析における避難者数は地域毎に重みを付けた 1000 人と設定する。図-4.5 に示す L1 地震津波に対する避難成功率は、60 歳以上のケースで地震発生から 10 分後の避難開始を始めた場合より被害が生じ始めている。第 1 波目の来襲が地震発生から 40～45 分後程度であるため、45 分後以降の被害率は殆ど変化していない。津波浸水開始後における避難成功の可否は初期位置への依存度が極めて高くなるためと考えられる。また、L1 地震津波のケースにおいてはあまり年齢の違いによる影響が見られず、避難開始時間による影響の方がより顕著である。

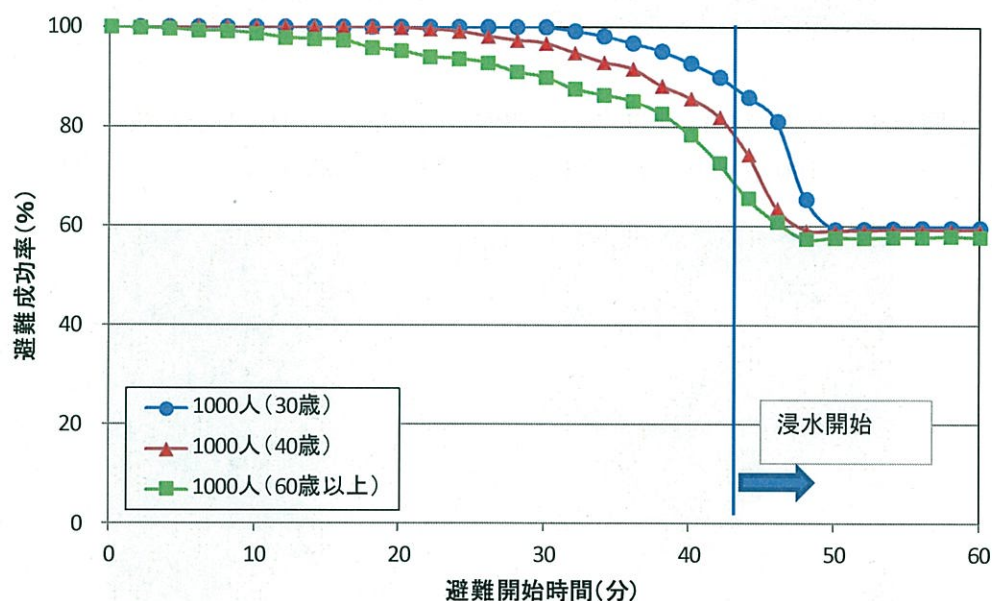


図-4.5 避難開始時間と避難成功率の関係（L1 地震津波，徒歩避難）

図-4.6 および図-4.7 に 60 歳以上の解析結果における避難時間コンター、避難困難者の初期位置分布を示す。避難開始時間が 20 分後のケースにおいては、避難困難者となる避難者の初期位置は潮見町先端部の海側に限定されている。一方、50 分後のケースでは、ほぼ浸水領域全域に跨っており、特に南町の北部付近の密集地域を初期位置とする避難者の避難困難率が顕著である。また、避難時間コンターから避難可能となった避難者においては、津波浸水により極端に避難時間を要する傾向が見られる。



図-4.6 避難困難者の初期位置と避難時間コンター (L1 地震津波)  
(60 歳以上, 避難開始 20 分, 避難成功率 96%)

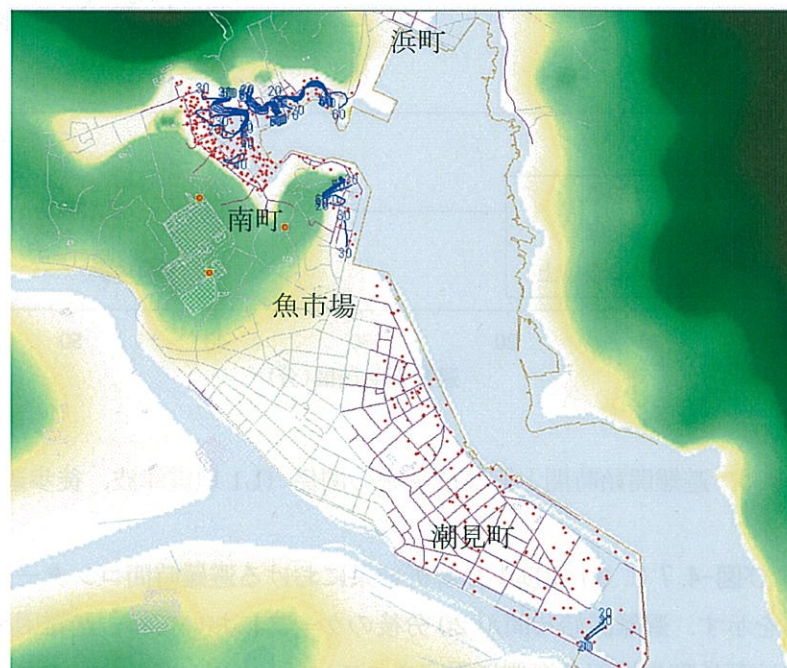


図-4.7 避難困難者の初期位置と避難時間コンター (L1 地震津波)  
(60 歳以上, 避難開始 50 分, 避難成功率 58%)



図-4.8 に L2 地震津波の場合の解析結果を示す。図より，L1 地震津波の場合よりも避難開始時間の遅れに伴う避難成功率の低下が際立っている。また，60 歳以上においては，地震発生直後に避難を開始したとしても逃げ遅れるケースが生じる。図-4.9 に示す 60 歳以上の解析結果における避難時間コンター，避難困難者の初期位置分布によると，L1 地震津波と同等に潮見町と浜町に初期位置をとる避難者が避難困難となりやすい傾向を示している。しかしながら，L1 地震津波の場合では，潮見町から魚市場に沿った沿岸部に避難困難者が分布する傾向を示していたのが，L2 地震津波ではより潮見町の先端部に集中している。その要因は，L2 地震津波では潮見町南部の河川遡上による浸水が顕著であった点があげられる。

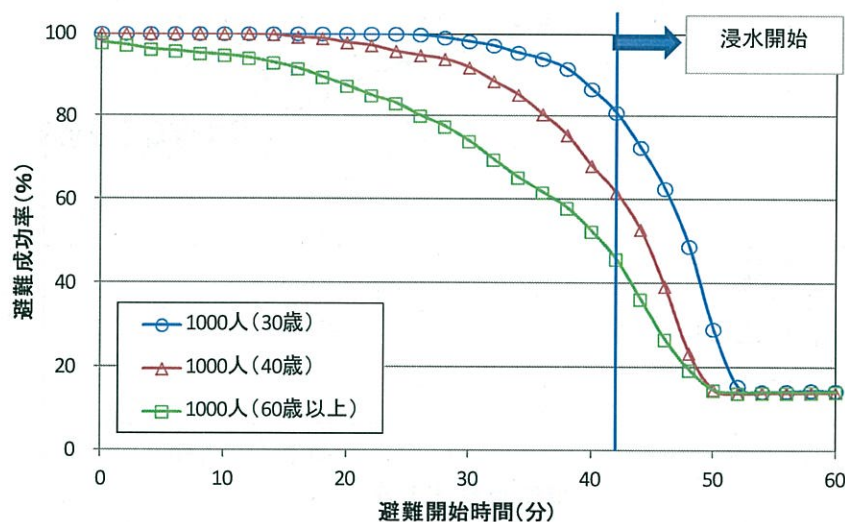


図-4.8 避難開始時間と避難成功率の関係 (L2 地震津波，徒歩避難)



図-4.9 避難困難者の初期位置と避難時間コンター (L2 地震津波)  
(60 歳以上，避難開始 20 分，避難成功率 85%)



## (2) 車両避難の場合

本解析では、車両避難の場合の被害想定を行うことを目的とし、通行台数を変化させたケースについて行うことで、渋滞やボトルネックの発生による避難成功率への影響を整理する。解析における走行車両台数は、300、600、1000 台の 3 ケースを対象とし車両台数の違いによる避難成功率への影響を確認する。なお、走行車両 1000 台は当時の地域住民の保有車両台数の約 30%の数値に該当している。

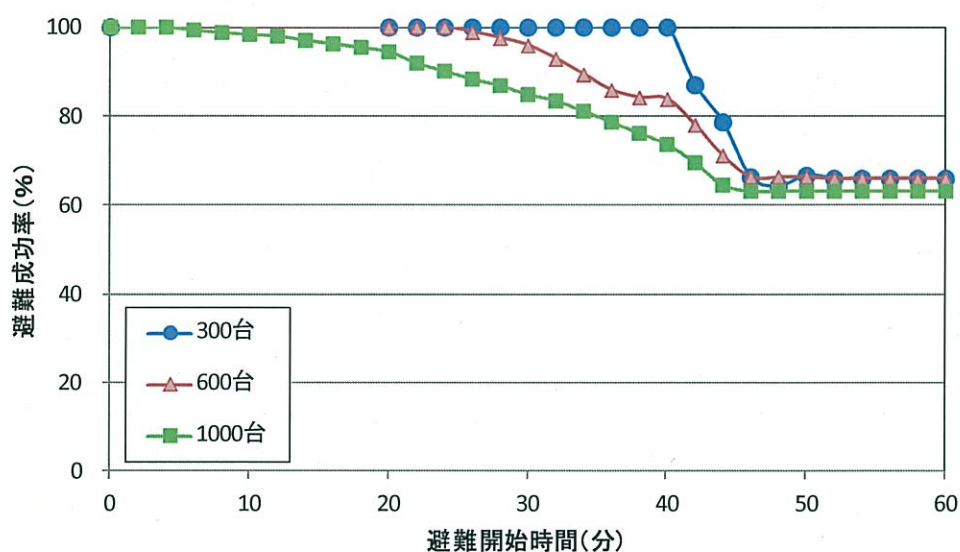


図-4.10 避難開始時間と避難成功率の関係 (L1 地震津波, 車両避難)

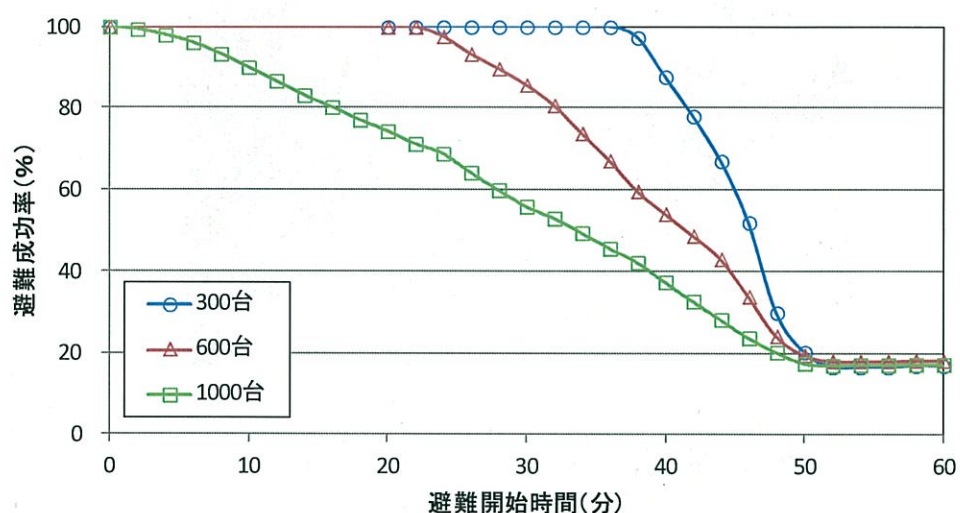


図-4.11 避難開始時間と避難成功率の関係 (L2 地震津波, 車両避難)

図-4.10 および 図-4.11 に車両による避難を対象とした解析結果を示す。図-4.10 に示す L1 地震津波のケースにおいては、走行車両の増加に伴い、避難開始時間の違いによる避難成功率への影響が顕著に表れている。特に、1000 台の場合においては、被害が発生する（成功率 100%以下）開始時間が大幅に早くなる結果を示している。また、被害が発生する開始時間は徒歩による避難のケース（図-4.7）よりも短くなっていることから、走行車両が 1000 台程度まで増加すると、避難手段としては、自動車よりも徒歩の方が有効であることが伺える。

図-4.11 に示す L2 地震津波の場合においても同様の傾向が伺える。L1 地震津波のケースよりも浸水地域がより広範囲に及ぶため、走行車両の増加に伴い避難成功率へ与える変化がより顕著に見られる。全体的に避難開始時間の遅延に伴う避難成功率の変化は、徒歩避難の場合では一定の割合で落ち込む傾向を辿っていたが、車両避難の場合では、やや不規則的な傾向を持っている。その傾向は車両台数の少ないケースの方が目立っている。その要因としては、一時的な渋滞の発生の有無により避難を終えるまでの時間が延び、その結果、避難途中に避難不可になる場合があるためであると思われる。L2 地震津波の 1000 台のケースにおいては、特に交差点での渋滞がボトルネックになっており、その結果、例えば地震発生から早急に避難を開始したとしても、人的被害の発生を防ぐことが困難であることを示している。

最後に、L2 地震津波のケースを対象に車両避難によって生じる渋滞箇所について解析結果と東北地方太平洋沖地震津波発生後の調査結果との比較を行う。図-4.12 は東北地方太平洋沖地震津波発生時の渋滞箇所を模式化したものであり、渋滞箇所は当地で撮影された津波時のビデオ画像（東北放送(2011)、東日本放送(2011)など）や気仙沼市からのヒアリングから確認した結果である。図-4.13 に示す解析結果と比較すると、渋滞箇所の発生地点と解析結果における道路使用頻度の高い箇所は非常に類似していることがわかる。

以上の結果より、本研究で構築した道路渋滞モデルを考慮した車両避難による解析は概ね妥当性のある手法であることを概略的に確認できたものと思われる。



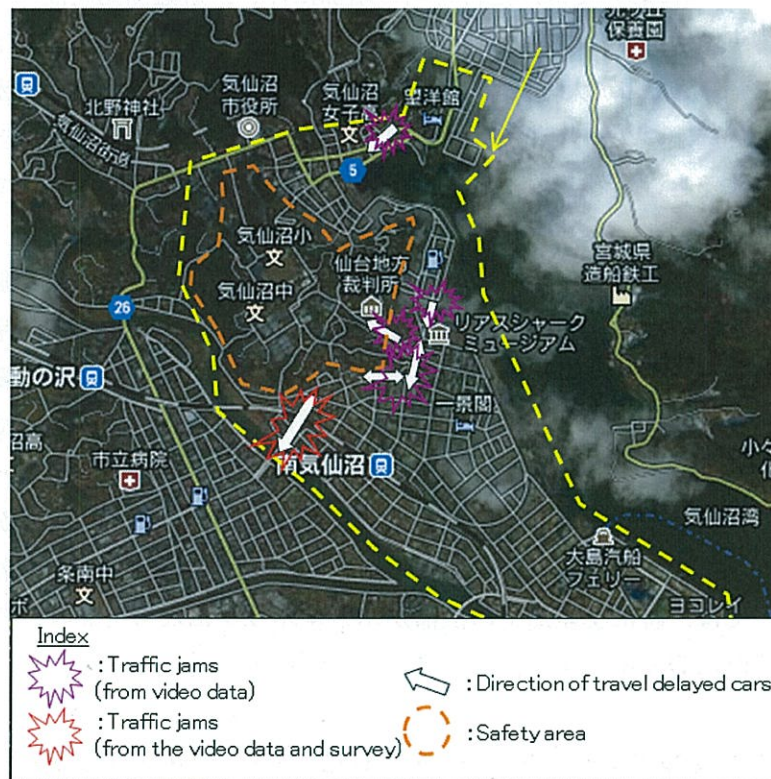


図-4.12 東北地方太平洋沖地震津波時の渋滞発生箇所の調査結果

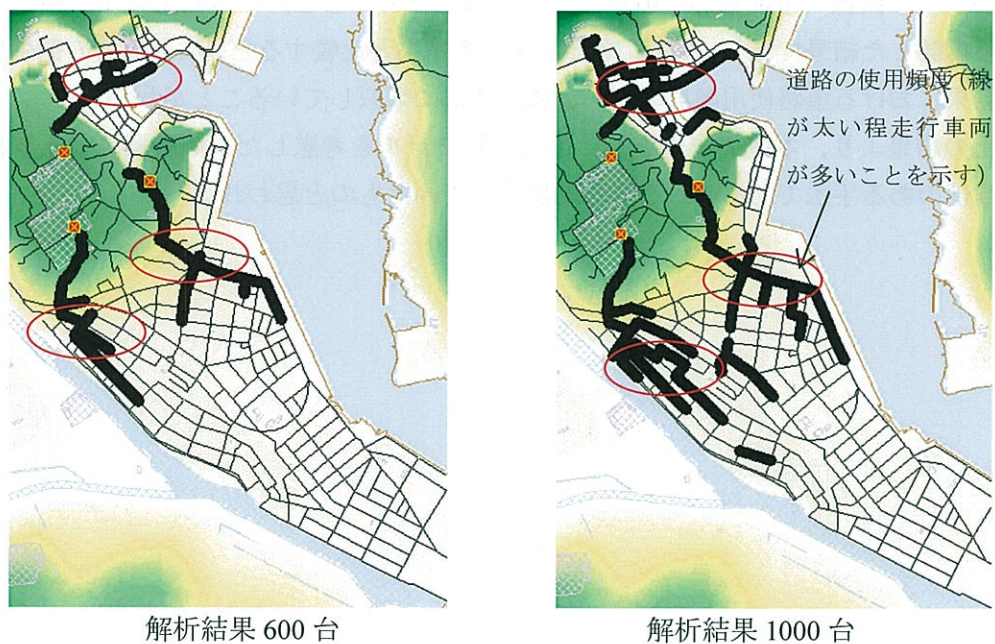


図-4.13 車両避難における道路の使用頻度 (L2 地震津波)



### 4.2.3 街路閉塞による避難成功率への影響

最後に街路閉塞による避難成功率へ与える影響を把握するために、街路閉塞を考慮した解析を行った。評価においてはモンテカルロシミュレーションによる 200 回の施行計算とした。図-4.14 および 図-4.15 に解析結果を示す。図中の街路閉塞を考慮した解析結果のプロットは、施行計算による平均値を示したものである。街路閉塞を考慮しない解析において避難成功率が高い避難開始時間では、街路閉塞による影響が明確になり、震度の増加（街路閉塞箇所増加）に伴う避難成功率の落ち込みが大きくなっている。また、考慮しない解析において避難成功率が低い場合には、浸水の影響が卓越するため街路閉塞の有無による違いがあまり見られなくなる。本研究による街路閉塞の考慮により、より現実的な人的被害の評価が可能と考えられる。

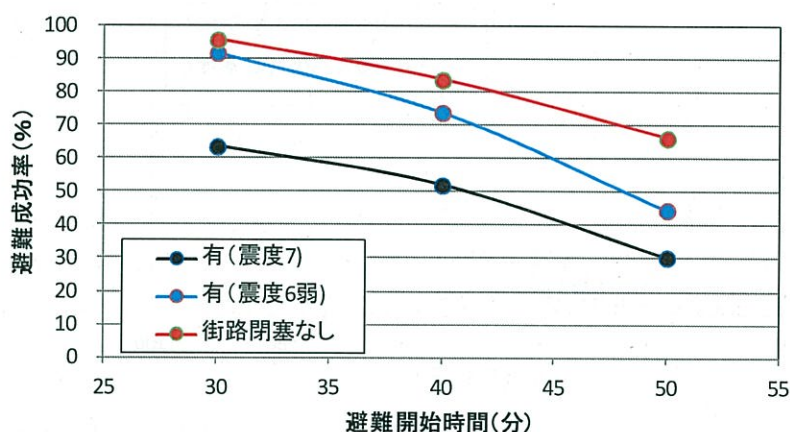


図-4.14 避難開始時間と避難成功率の関係（L1 地震津波，車両避難）  
（街路閉塞により避難成功率へ及ぼす影響）

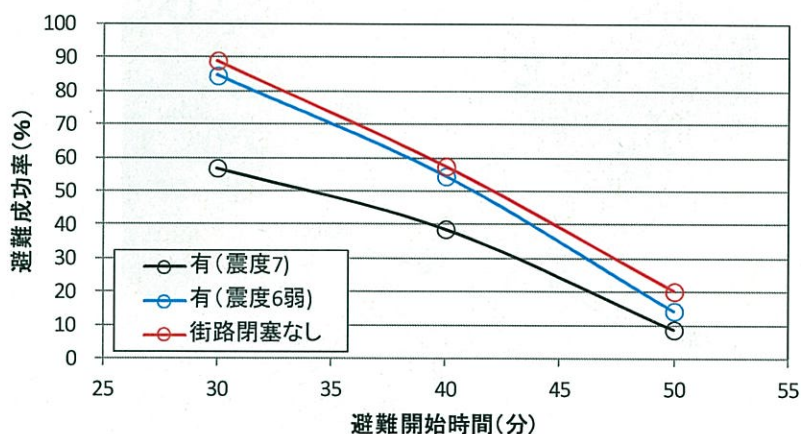


図-4.15 避難開始時間と避難成功率の関係（L2 地震津波，車両避難）  
（街路閉塞により避難成功率へ及ぼす影響）

街路閉塞による影響をより詳細に検討すると以下の傾向が見られる。図-4.16はL2地震津波のケースにおける避難成功率の確率頻度分布を示したものであるが、避難成功率の出現傾向は大きなばらつきが見られる。これは、特定の地点が街路閉塞するかしらないかで、避難成功率が大きく変わること示している。すなわち、気仙沼大川北部地点では、図-4.17に示す4つの経路が主要な避難路としての重要度が大きい傾向を示している。これらはそれぞれが高台の安全地帯に通じる広幅の道路である。図には示していないが、これらの経路が閉塞するかしらないかで、平均的に30%もの成功率の変動が生じている。したがって、本検討の結果、街路閉塞による影響を考慮したより現実的な人的被害を試みようとする場合には、本研究で用いた瓦礫幅の確率分布に基づく確率的な評価よりも、避難経路としての利用度に着目した考察などが重要であると思われる。

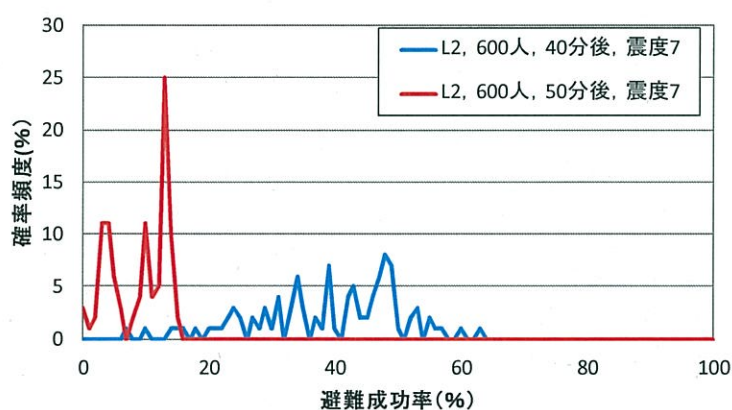


図-4.16 モンテカルロシミュレーションによる避難成功率の確率頻度分布（L2地震津波）

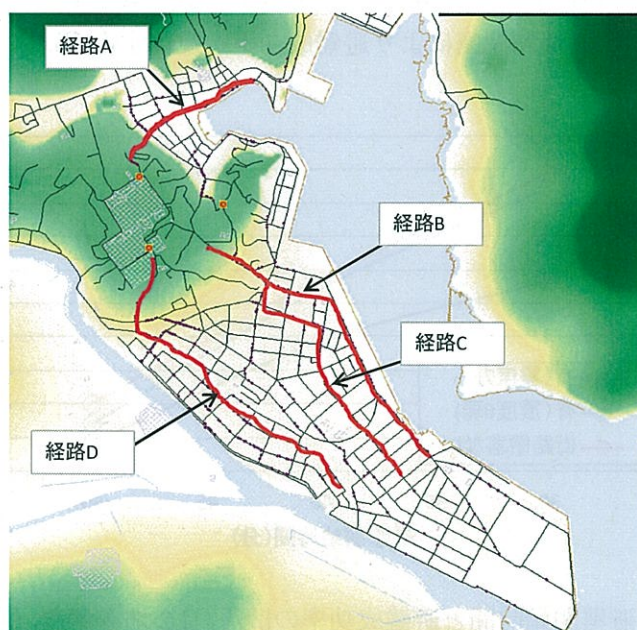


図-4.17 避難成功率に影響を及ぼす主要経路の模式図





図-4.18 避難経路の利用頻度

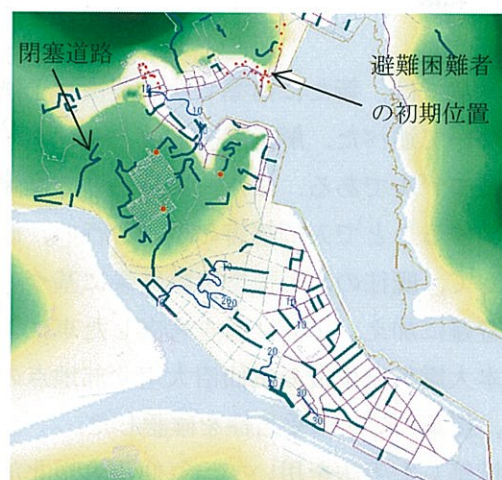


図-4.19 街路閉塞の例（震度7）



### 4.3 結論

本章では、新たに構築した津波被害予測の中における人的の被害予測を行う解析コードについて述べた。解析コードは、リンク・ノードモデルに基づく避難所等の目的地に避難するモデルである。また、あらかじめ計算した津波浸水解析の結果に対する避難成功率を算出することで人的被害の予測を行い、津波に対する避難限界の設定（避難不可の判定）として、既往の水理模型実験結果に基づいた現実的な設定値を考慮した。また、従来の歩行避難に加え、車両渋滞を考慮した車による避難モデルを付加させたモデルを提案し、東日本大震災発生後の気仙沼大川北部地点の渋滞発生位置について調査結果と解析結果により、提案モデルの妥当性を確認した。

構築した手法を用いて、気仙沼大川北部地点を対象とした人的被害の予測計算を行い、徒歩と車両による避難行動においての被害特性についてそれぞれ詳細な考察を述べた。L2地震津波のケースでは、車避難の走行台数が1000台程度まで多くなると、交通渋滞の影響により徒歩よりも逆効果となり、人的被害が増加することなどがわかった。

## 参考文献

- [1] 瀧本浩一, 三浦房紀, 清野純史: 防災要因と避難者の間の情報伝達を考慮に入れた避難行動シミュレーション, 土木学会論文集, No.537, pp.257 - 266, 1996.
- [2] 津波対策検討委員会: 津波対策推進マニュアル, 457p., 2002.
- [3] 西畑剛, 森屋陽一, 田村保, 瀧本浩一, 三浦房紀: 津波浸水時の避難条件に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 52 巻, 第 2 号, pp.1256-1260, 2005.
- [4] 成瀬圭, 中根一朗: 最適速度関数を用いた高速道路自然渋滞のシミュレーション, 神奈川県産学公交流研究発表会, 2006.  
<http://www.kanagawa-iri.go.jp/kitri/kouhou/program/H18/p181020.html>
- [5] 馬場康之, 石垣泰輔, 戸田圭一: 水没した自動車からの避難の難しさ, 京都大学防災研究所年報, 第 53 号 B, pp. 553-559, 2010.
- [6] 赤倉康寛, 高橋宏直, 中本隆: 都市臨海部地震被害予測のための街路閉塞現象のモデル化の試み, 港湾技術研究所報告, 第 39 巻, 第 3 号, pp.19-41, 2000.
- [7] 田村保, 西畑剛, 森屋陽一, 瀧本浩一, 三浦房紀: 街路閉塞を考慮した津波浸水計算時の避難シミュレーション手法の適用, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.1286-1290, 2005.
- [8] 高橋宏直, 赤倉康寛, 中本隆, 吉村藤謙 (1998): 兵庫県南部地震による被害を踏まえた街路閉塞シミュレーションに関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.3131-3136, 1998.





## 第5章 津波防波堤の倒壊被害評価

本章では、津波防波堤の被害予測の評価方法とその妥当性について調べた。まず本研究において構築した断面2次元の防波堤安定性解析コードについて述べるとともに、防波堤の大変形破壊を再現した水理実験結果との比較計算により解析コードの妥当性を確認する。次に、気仙沼大川北部地点に沖合防波堤を仮想的に構築した場合の、津波防波堤の被害特性変化について詳細な考察を行う。

### 5.1 津波防波堤の大変形破壊解析手法の概要

#### 5.1.1 津波防波堤のモデル手法

本研究では、後藤<sup>1)</sup>らのMBSコード(Movable Bed Simulator)に基づく高山ら<sup>2)</sup>のモデルを基本として用いる。高山らのモデルは、マウンド要素をDEM(Distinct Element Method/Discrete Element Method)法により再現している。また、本研究では個別要素を従来の円形ではなく楕円モデルとすることで、捨石同士の噛み合わせ効果を期待した点に特徴がある。楕円要素を用いたDEM法は、接触判定の考え方と接触力の作用方向の決定方法が従来とは大きく異なる。ここでは、楕円要素を用いた場合の接触判定および接触力の作用方向の評価方法を中心に述べる。まず、楕円要素の2粒子間の接触判定は以下となる。

$$f_i(x_i, y_i) = \left(\frac{x_i}{a_i}\right)^n + \left(\frac{y_i}{b_i}\right)^n - 1 \quad (5.1)$$

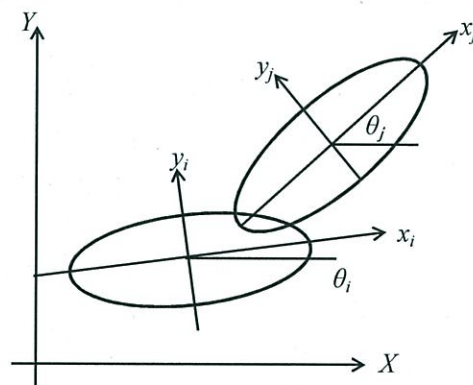


図-5.1 楕円要素モデルの概念図

ここに、 $a_i$ 、 $b_i$ は粒子 $i$ の長径、短径の半分の長さである。粒子 $i$ の境界は $f_i(x_i, y_i) = 0$ で示し、内部は、 $f_i(x_i, y_i) < 0$ 、外部は $f_i(x_i, y_i) > 0$ で定義される。 $n$ は楕円であるため2となる。

粒子 $i$ の境界上の任意点の座標は、楕円中心を原点とするローカル座標系において、式(5.2)となる。

$$\begin{bmatrix} x_i^I \\ y_i^I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_i \text{sign}(\cos \alpha_i) |\cos \alpha_i|^{\frac{2}{n}} \\ b_i \text{sign}(\sin \alpha_i) |\sin \alpha_i|^{\frac{2}{n}} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

ここに、 $\alpha_i$ は $0 \sim 2\pi$ の範囲の変数であり、境界上の位置座標は $\alpha_i$ により定義される。

粒子 $i$ の中心の全体座標 $(X, Y)$ の中心を $(X_i^G, Y_i^G)$ 、粒子 $j$ の中心を $(X_j^G, Y_j^G)$ とすると、粒子 $i$ のローカル座標系における境界上の点 $(x_i^I, y_i^I)$ は、粒子 $j$ のローカル座標系 $(x_j^I, y_j^I)$ を用いて式(5.3)で表わされる。

$$\begin{bmatrix} x_i^J \\ y_i^J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j - \theta_i) & \sin(\theta_j - \theta_i) \\ -\sin(\theta_j - \theta_i) & \cos(\theta_j - \theta_i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^I \\ y_i^I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_j & \sin \theta_j \\ -\sin \theta_j & \cos \theta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i^G - X_j^G \\ Y_i^G - Y_j^G \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

ここに、 $\theta_i, \theta_j$ はそれぞれ、粒子 $i$ と粒子 $j$ の各ローカル座標軸が全体座標の座標軸に対してなす角度である。なお、反時計回りを正と定義している。

粒子 $j$ の接触のポテンシャル $f_i(x_i, y_i)$ は、式(5.1)、式(5.2)、および式(5.3)を用いて、 $\alpha_i$ の関数となる。接触のポテンシャルが負で絶対値が最小となる $\alpha_i$ の値において、最も粒子 $j$ の内部にあることを示している。本解析では、その点を粒子 $i$ 側の接触点と定義している。なお、 $\alpha_i$ を変化させても接触のポテンシャルが負とならない場合は、両者は非接触となる。

円要素では接触点がわかれば、要素間の反力作用方向が決定される（作用方向は中心点と接触点とを結ぶ方向であり法線ベクトルが決定される）。しかし、楕円要素の場合には一意的に決定されず、また要素の回転によって接触力が変化（回転ベクトルの影響）する。本研究では、仮想円の概念を導入して法線ベクトルを定義する。

一般に、関数 $f(x, y) = 0$ の任意点における曲率半径 $\rho$ は式(5.4)となる。

$$\rho = \frac{\left\{ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}{\left\{ \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 - 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \frac{\partial f}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \right\}} \quad (5.4)$$

接触判定の時に、評価した接触点における曲率半径 $\rho_i$ が決まる。関数 $f(x, y) = 0$ の任意点における法線ベクトル $n$ は式(5.5)となる。

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla f(\mathbf{x}, y)}{|\nabla f(\mathbf{x}, y)|} \quad (5.5)$$

ついで、接触点において粒子  $i$  側の曲率半径と等しい半径を持つ円を考える。その中心の座標成分は  $c_{xi}, c_{yi}$  は、粒子  $i$  のローカル座標系において式(5.6)になる。概念図を図-5.2 に示す。

$$\begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \end{bmatrix} - \rho_i \mathbf{n}_i \quad (5.6)$$

同様に粒子  $j$  側においても、楕円  $j$  の曲率半径と同じ半径を持つ円が定まる。そしてこれらの仮想円同士が接触しているものとして、法線方向ベクトル、接触力を評価する。

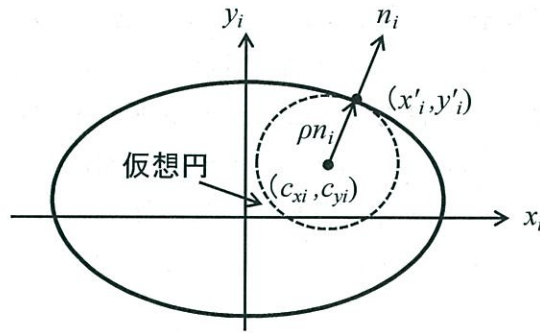


図-5.2 仮想円の概念図

仮想円を用いた侵入距離  $\delta_n$  は式(5.7)で定義し、侵入距離の増分  $\Delta\delta_n$  は式(5.8)となる。

$$\delta_n = \rho_i + \rho_j - d \quad (5.7)$$

$$\Delta\delta_n = \delta_n(t) - \delta_n(t - \Delta t) \quad (5.8)$$

さらに、回転運動による侵入距離の変化は、要素中心から接触点までの距離  $Arm_{ij}$  を用いて、式(5.9)で評価する。概念図を図-5.3 に示す。

$$\Delta\delta_{sr} = (Arm_{ij} \cdot \Delta\theta_i) \mathbf{e}_i(t - \Delta t) \cdot \mathbf{e}_s(t) + (Arm_{ji} \cdot \Delta\theta_j) \mathbf{e}_j(t - \Delta t) \cdot \mathbf{e}_s(t) \quad (5.9)$$



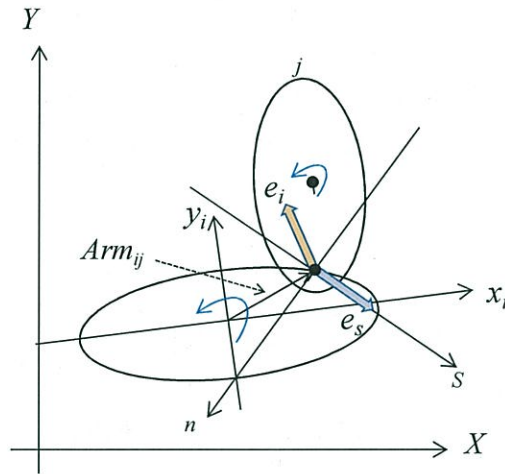


図-5.3 接触力作用方向の概念

ここに、 $\Delta e_{sr}$  は単位時間当たりの要素の回転による侵入距離の変動分、 $e_i, e_j$  は粒子  $i, j$  の中心から接触点へ方向ベクトルと直行する単位ベクトル、 $e_s$  は接線方向の単位ベクトル、 $n$  は、粒子  $i$  側の仮想円の中心点と接触点とのベクトルに平行な線分をそれぞれ示している。侵入距離および接触力の作用方向の情報を元に、弾性バネと粘性ダッシュポッドを並列バネモデル<sup>3)</sup>により解き、要素間の作用力をそれぞれ求める。

### 5.1.2 パラメータ値の高度化

本研究では、5.1.1 節にて説明した 2 次元解析コードを、ケーソンおよび捨石運動に適応させるため、以下の点について拡張したモデルを用いる。

#### (1) ケーソンのモデル化および外力の作用方法

ケーソンは剛体の集合体と見なし、波力による外力は水理模型実験で計測した波圧分布を境界要素に個別に作用させる一方向モデルとする。波圧力は、ケーソン要素へ個別に圧力を与えることで、波力による影響を考慮する。図-5.4 に波力作用モデルイメージ図を示す。

以下の定式化では、波との連成解析化までを図ることを念頭におき、ケーソンは単一要素ではなく、複数要素にてモデル化を行うように設定する。外力の点数は、計算の簡略化のため、水平波力、揚圧力、重心位置の水平波力モーメントおよび揚圧力モーメントが釣り合うようにそれぞれ 2 点の要素に作用させる方法とする。なお、ケーソンは、完全剛体

と仮定し重心位置の情報（水平，鉛直，回転角）を元に，各要素の位置を決定するように設定している．

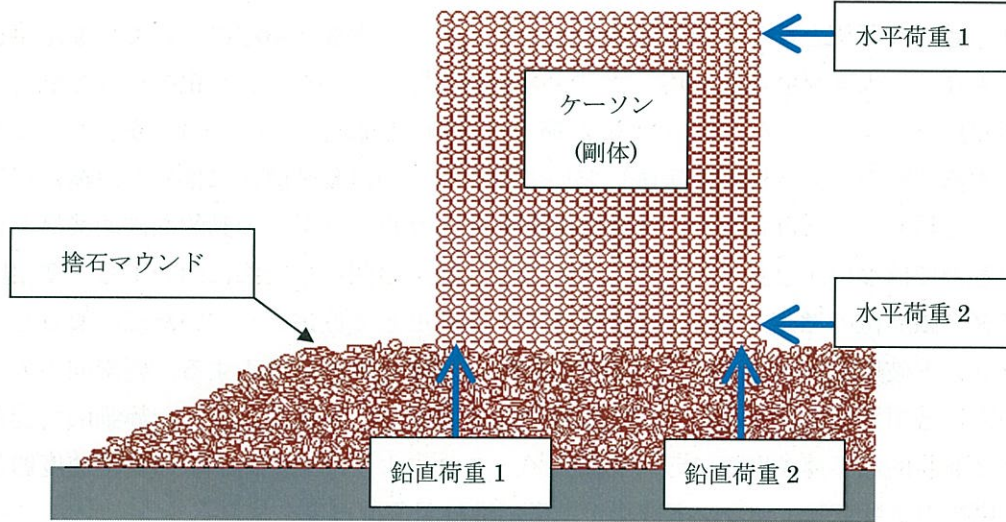


図-5.4 波力作用モデルのイメージ

## (2) 剛体ケーソンの付加質量の改良

ケーソンの大変形が生じる領域を解析で評価する場合には，ケーソンの運動に及ぼす水の粘性力の影響が大きくなるため，剛体ケーソンの運動方程式に水の粘性を反映した変動型の付加質量力を新たに導入する．具体的には，下迫ら<sup>4)</sup>の成果を援用し，ケーソンの沈下や傾斜に伴う付加質量力の変化を考慮する手法を用いる．したがって，ケーソンの付加質量力は式(5.10)で評価でき，またケーソン重心位置の運動式は式(5.11)とする．なお，解析ではケーソンの初期水位に対する平均沈下量に応じて付加質量が変動するように設定している．

$$Ma = 1.0855 \rho h'^2 \quad (5.10)$$

$$\left( \frac{W}{g} + Ma \right) \ddot{x}_G = \bar{F} - \bar{F}_R \quad (5.11)$$

ここに， $W$  はケーソン質量， $Ma$  は付加質量， $x_G$  は重心位置の加速度， $F$  は外力の合力， $F_R$  は摩擦抵抗， $\rho$  は水の密度， $h'$  はケーソン底面から静水面までの高さをそれぞれ示している．

### (3) 要素同士のせん断方向力に適用するスライダー（粒子間摩擦）のパラメータ値

過去の研究成果では、ケーソンの微小変位の発生領域においては、解析結果の方が実験値よりも過大な評価となることが示されている。一方、大変形領域についての検証事例は極めて少なく、大変形領域に対応した“大きな捨石”に適したモデル化の在り方などについての知見も少ない。また、後述の 5.2 節にて詳細を記載するが、筆者らが行った偶発波浪に対する防波堤の大変形破壊実験においては、一定の滑動破壊後に捨石が急激に崩壊・盛り上がる現象が見られており、実際には何らかのマウンド群への動的な破壊機構が作用しているのではないかと見受けられる。そこで、従来の個別要素法においては、要素間のスライダー限界値の考え方を静止摩擦相当の一定値として仮定されていた点に着目し、動的なマウンド破壊を再現できるように不連続的な摩擦モデルを導入する。要素同士のせん断方向力に適用するスライダー（粒子間摩擦）のパラメータ値に着目し、静動的な変化を踏まえた簡易的な不連続摩擦モデルを用いる。これにより、マウンド石の変位速度増加によって摩擦力が低下し、マウンド変形が急激に進む現象の再現を試みる。

なお、本研究では、粒子間速度の増加に伴ってスライダーが線形的に変化するモデルを用いることとし、上限値を捨石の安息角から算出した粒子間摩擦角に対し 0.7~0.9 の範囲で変化させたパラメータスタディを行う。図-5.5 に不連続摩擦モデルの概念図を示す。

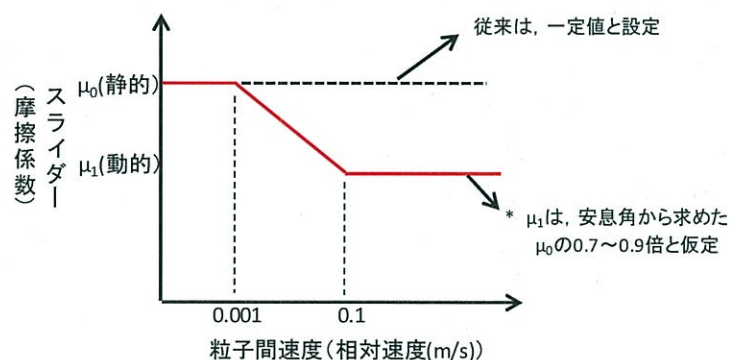


図-5.5 不連続摩擦モデルのイメージ

以上のように、本研究では、既往の DEM を用いた防波堤の破壊解析手法に、3 つの新たな物理機構を組み込むことで、計算の高度化を図り手法の適用性向上を図ることを目的とした。



## 5.2 解析手法の妥当性の確認

### 5.2.1 水理模型実験の概要

構築した数値解析手法の妥当性の検証に用いる水理模型実験は、五洋建設株式会社技術研究所の二次元造波水路（長さ 50 m，幅 0.6 m，高さ 1.2 m）にて実施した結果である。模型縮尺はフルード則に準じた 1/30 であり，実験断面は，捨石マウンドの支持力破壊が原因と判定される防波堤の被災事例を参考に設定している。実験においては，ケーソンの変位や地盤反力などについての詳細な計測を行っている。なお，実験条件や結果の詳細については，宮田ら<sup>5)</sup>を参照されたい。図-5.6 および 表-5.1 に再現計算を行った実験ケース一覧を示す。

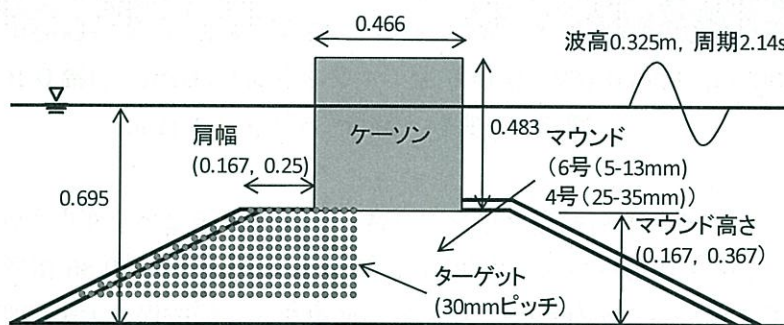


図-5.6 実験および解析条件 (単位：m)

表-5.1 検討ケース (単位：m)

ケース	マウンド	低		高
	肩幅	普通	大	普通
	粒径	普通		大
水深(m)		0.695		
波高(m)		規則波，波高 0.325m，周期 2.14s		
ケーソン		高さ 0.483 × 幅 0.466 × 奥行 0.580 (水中質量 1.47kN)		
マウンド高さ(m)		0.167		0.367
マウンド肩幅(m)		0.167	0.25	0.167
粒径		6号砕石 (中央粒 5・13mm)		4号砕石 (中央粒径 25・35mm)

\*)その他，偶発波浪以下の波を作用

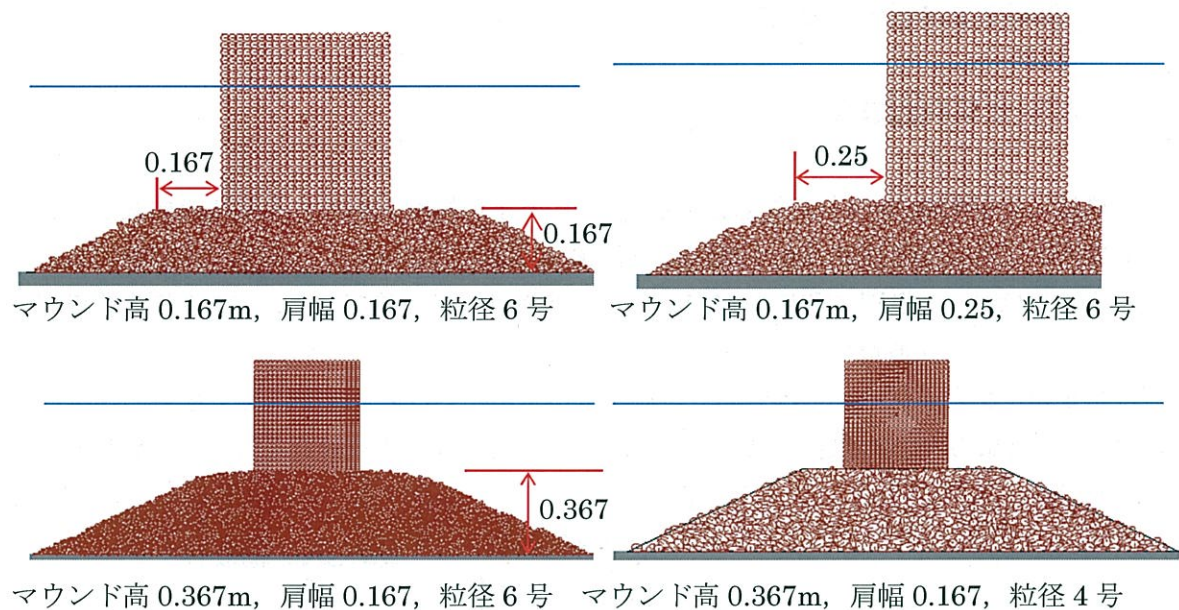


図-5.7 実験・解析モデル (単位:m)

実験は、マウンド背後の肩幅やマウンド高さ、および粒径などを変化させたケースについて実施されている。作用外力は、静的釣合に基づく滑動安全率が 0.85 相当の規則波を 20 波程度作用させ、ケーソンの傾斜やマウンドの崩壊を伴う混成堤の大規模変形を発生させている。

## 5.2.2 水理模型実験の再現計算結果

### (1) 計算条件

#### 1. 不連続摩擦モデル

本研究に用いた不連続摩擦モデルのパラメータは、表-5.2 の摩擦モデルの設定一覧に示した通りである。なお、粒子間摩擦の上限設定が不連続化する粒子間の相対速度については変化をつけていない。

表-5.2 不連続摩擦モデルの設定一覧

	粒子間摩擦 (静的)	粒子間摩擦 (動的)	適用
ケース 1	0.60 (ケーソンと捨石) 0.65 (捨石と捨石)	1.00 倍	要素の相対速度が 0.001m/s~0.1m/s の間で 摩擦変化が発生 (図-5.5 参照)
ケース 2		0.90 倍	
ケース 3		0.85 倍	
ケース 4		0.80 倍	
ケース 5		0.70 倍	



## (2) 波力モデル

再現解析では、実験で計測した規則波の波圧データを外部荷重として作用させた。なお、波圧はケーソンの付加質量分をあらかじめ控除してモデル化したデータを用いた。図-5.8 にモデル化した波圧合力の時刻歴を示す。外力は波高 0.325 m, 周期 2.14 s の規則波とし、実験と同様に 20 ～ 30 波程度繰り返し作用させた。なお、モデル化したデータのピーク波力を用いた静的釣り合い計算からは、マウンド高 0.167 のケースで滑動安全率が 0.85, マウンド高 0.367 のケースで 0.91 となっている。

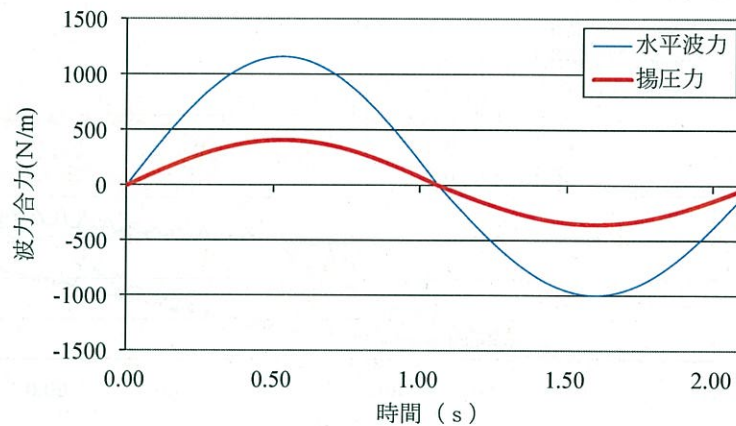


図-5.8 波圧時刻歴データ

## (3) 解析結果 1 (低いマウンドで肩幅が普通の場合)

低いマウンドで肩幅が普通の場合について、図-5.9 にマウンド高さ 0.167 m, 肩幅 0.167 m のケースにおけるケーソン中心位置の変位時刻歴を示す。実験結果においては、造波開始直後は押波の影響を受けて水平変位が線形的に増加しており、開始から 30 s において沈下と回転を伴う急激な破壊が進展している。その急激な回転変位の発生に伴うその後の 40 s 付近では、背後マウンドの盛り上がりによるカウンター効果によって、ケーソンの変位・回転の変化がほぼ停止している。なお、宮田ら<sup>5)</sup>は初期の水平変位のみが発生する時間帯を初期段階、大きな回転の発生を伴う時間帯を進行段階、破壊が停止する時期を安定段階とそれぞれ命名している。本研究では、実験結果の観察を行った際に、初期から進行段階に移行する要因として、動的な外力の作用により捨石同士の摩擦変化が生じているのではないかと推察し、これを解析で考慮する試みとして従来の DEM におけるスライダーの設定に着目し、不連続摩擦の概念を導入するに至っている。解析結果は、不連続摩擦モデルを設定せず付加質量のみを考慮したケースでは水平変位のみが増加する時間帯では実験結果を良好に再現できているものの、破壊の急激な進展は再現できておらず、開始から 60 s を経過してもなお、一定量の水平変位のみが継続して増加する結果を示している。不連続摩



擦モデルを考慮したケースでは、上限値が 0.9 の場合、水平変位はある程度再現できているものの、沈下量や回転角は実験結果よりも小さい傾向を示している。また、急激な破壊の進展もあまり再現できていない。逆に、0.7 まで低減させると、進行段階に移行する時間帯は実験結果に近づくものの、破壊が停止するまでに実験結果の 2 倍程度の水平変位が発生する結果となっている。上限値が 0.85 や 0.8 の場合では、進行段階に移行するタイミングが実験値よりも 20 s 程度遅れているものの、最終的な水平変位や沈下量については概ね実験結果を再現できている。本検討結果からでは、不連続摩擦モデルとして、上限値を 0.85 程度とした概念を導入することで、既往の解析手法よりも実験結果の再現性がより一層向上できるものと考えられる。

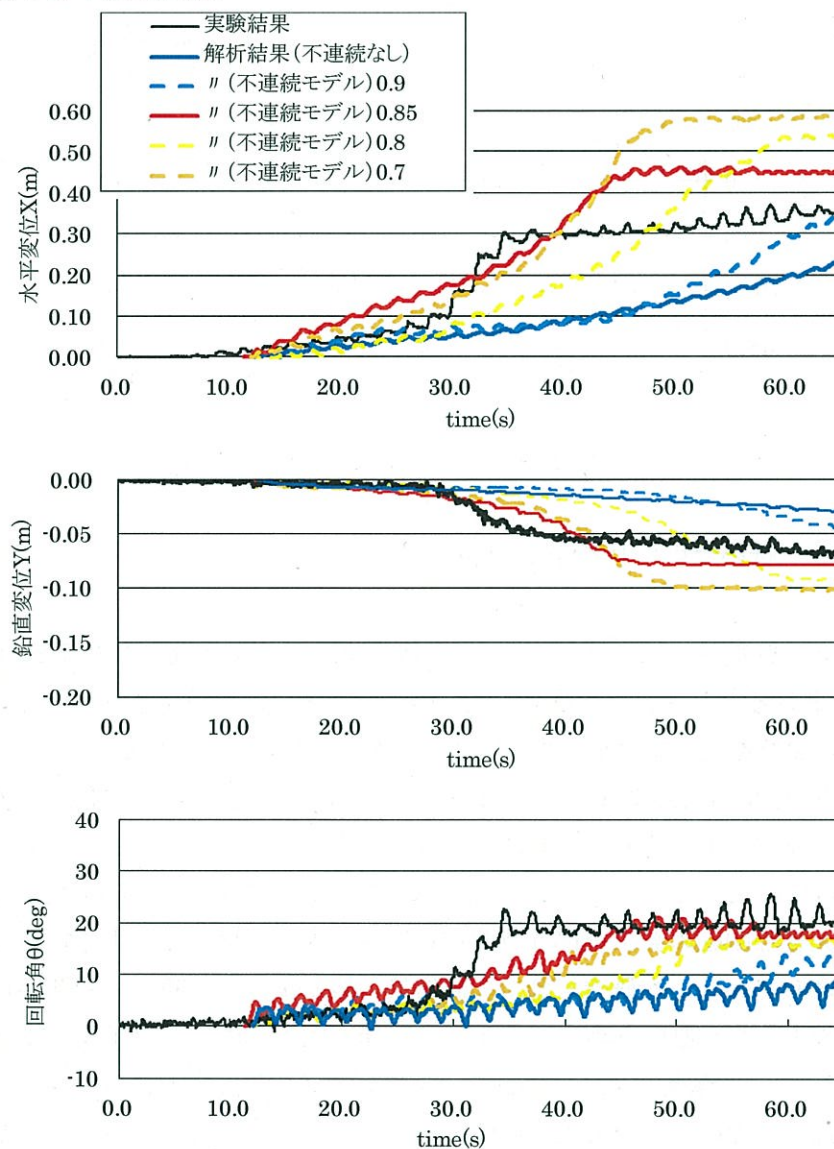


図-5.9 ケーソン中心変位・回転角の比較

(低マウンド 0.167 m, 肩幅 0.167 m)

上段：水平変位，中段：鉛直変位，下段：回転角

図-5.10 から図-5.12 に、開始から 45 s における捨石の移動の軌跡および姿図の比較を示す。なお、捨石の変位ベクトルは、それぞれの初期位置と開始から 45 s における石の中心位置を直線で結んで整理したものである。図-5.10 に示す実験結果では、初期に法肩付近にある石は上方向寄りへ盛り上がるような挙動を示している。地盤境界付近の底面に配置した捨石は水平へ移動する軌跡を示しており、ケーソンの変位発生に伴う地盤反力が底面まで影響を及ぼしていることがわかる。解析結果は、概ね実験結果を再現できているものの、実験結果に比べて各捨石の移動量にばらつきがみられるとともに、法肩付近の上方向への盛り上がる挙動があまり見られず、水平方向への移動が目立つ傾向を示している。そのため、ケーソンの変位抑制に寄与する背後に盛り上がるマウンドの量も実験結果より若干少ない。その結果、安定段階に至るまでの水平変位量が実験結果よりも大きくなったものと考えられる。この要因は、今回導入した楕円形モデルにあり、実際の捨石同士のかみ合わせの効果が完全には再現しきれていないためと考えられる。実験結果と解析結果（不連続摩擦モデル 0.85）の姿図を比較した図-5.12 によると、回転角にやや違いが見られるものの、マウンドの破壊具合やケーソンのめり込む様子など、定性的には両者は良好な対応を示している。

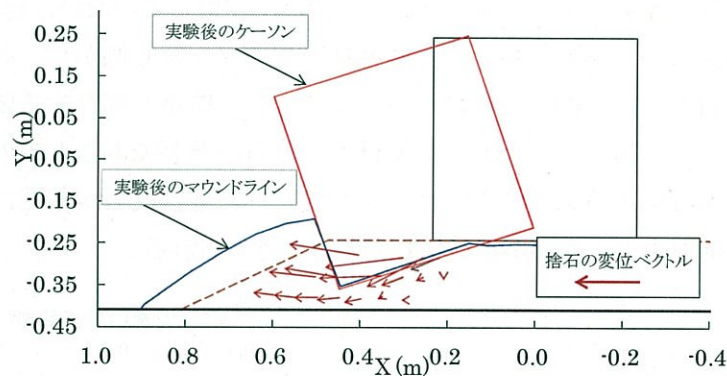


図-5.10 捨石移動の軌跡：実験結果，実験開始 45 s

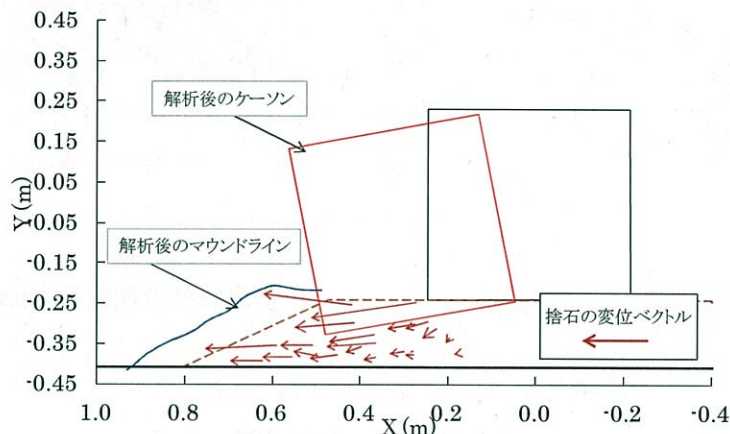


図-5.11 捨石移動の軌跡：解析結果  $\mu_f=0.85\mu_0$ ，計算開始 45 s



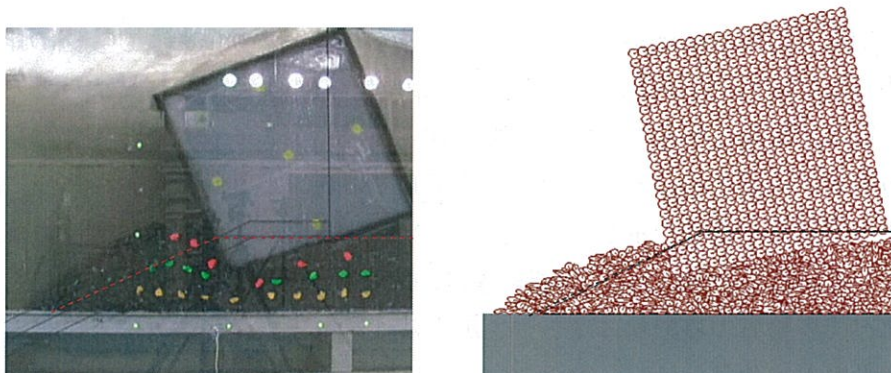
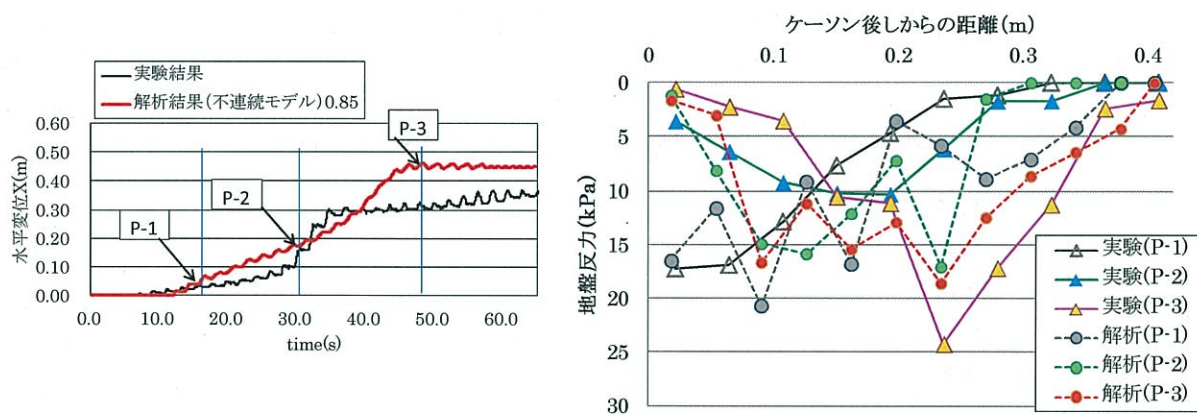


図-5.12 ケーソンおよびマウンド破壊状況の比較  
(左：実験，右：数値計算，実験開始 45 s)

図-5.13 に押波時のケーソン地盤反力の比較を示す．比較においては，ケーソンの変位発生段階毎に概ね同じ波数のタイミングで抽出している．実験結果では，初期段階（P-1）では，ケーソン後趾にピークをとる三角形の荷重分布となっている．その後，回転の発生やマウンドの崩壊の影響によって荷重のピーク位置がケーソン中心寄りに移行し，P-3 の変位がほぼ停止する段階ではケーソン両端部には殆ど荷重が作用していない．解析結果では，ばらつきが見られるものの，実験結果と同様に初期のケーソン後し側から，ケーソン中央部へ荷重の集中が移行していく様子が概ね再現できている．荷重が移行する要因はマウンドの崩壊に関係している．当初，ケーソン後趾付近の捨石が顕著であるものの，マウンドが大きく崩れ，捨石が移動することによりケーソン後しへの地盤反力が極端に低減し，そのため底面荷重が扁平化するような現象が生じていると考えられる．



水平変位時刻歴

指定時刻の地盤反力分布

図-5.13 ケーソン地盤反力の比較  
(低マウンド0.167 m，肩幅0.167 m)



#### (4) 解析結果 2 (低いマウンドで肩幅が広い場合)

低いマウンドで肩幅が広い条件である，マウンド高さ 0.167 m，肩幅 0.25 m のケースにおけるケーソン中心位置の変位時刻歴を図-5.14 に示す．なお，解析では，不連続摩擦を考慮しない場合と不連続摩擦の上限を 0.85 と設定したケースのみ実施している．実験結果においては，造波開始直後は押波の影響を受けて水平変位が線形的に増加し，肩幅普通のケースとほぼ同様に 35 s 経過した後に回転を伴う急激な破壊が進展している．しかし，マウンドの肩幅が広いため，回転や沈下などの発生量は比較的小さい結果である．一方，解析においては不連続モデルを考慮しないケースで，肩幅普通のケースの検討結果と同様に線形的な破壊が進むだけで，35 s 付近での進行段階に移行する状況を再現できていない．上限値 0.85 のケースでは，移行するタイミングが遅いものの，最終的な変位量は概ね実験結果を再現できており，不連続摩擦を導入することで再現性の向上効果が得られている．

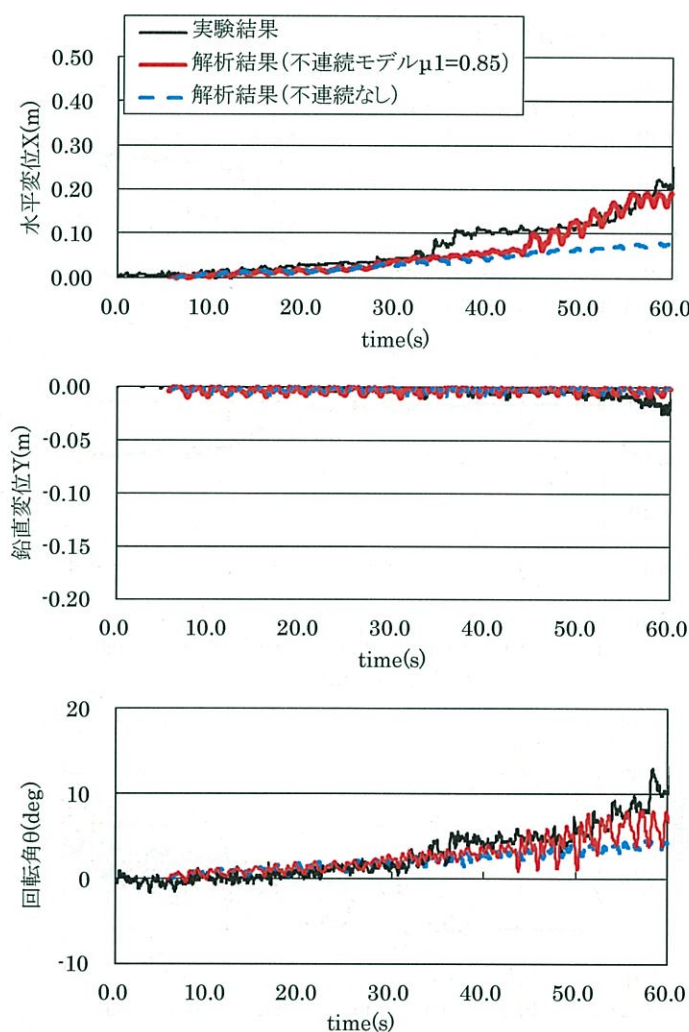


図-5.14 ケーソン中心変位・回転角の比較  
(低マウンド 0.167 m，肩幅 0.25 m)

(5) 解析結果3（高マウンドで捨石粒径が普通の場合）

高マウンドで捨石粒径が普通の場合について、図-5.15 にマウンド高さ 0.367 m, 肩幅 0.167 m のケースにおけるケーソン中心位置の変位時刻歴を示す。なお、解析は、不連続摩擦を考慮しない場合と不連続摩擦の上限を 0.85 と設定したケースのみ実施した。実験結果は、低いマウンドのケースとあまり破壊状況に変化が見られないものの、やや沈下量が小さくなる傾向などを示している。一方、解析結果では、不連続モデルの設定による変形への差があまり見られない結果を示している。また、初期の回転角の発生量が実験結果よりも大きくなるなどの違いは生じているものの、不連続モデルを導入した方が実験結果との対応が多少は良好になっている。図-5.16 に 40 s 経過後の実験結果と解析結果（不連続摩擦モデル 0.85）の姿図の比較を示す。この図より、マウンドのめり込み具合などについて概ね両者は良好な対応を示していることがわかる。

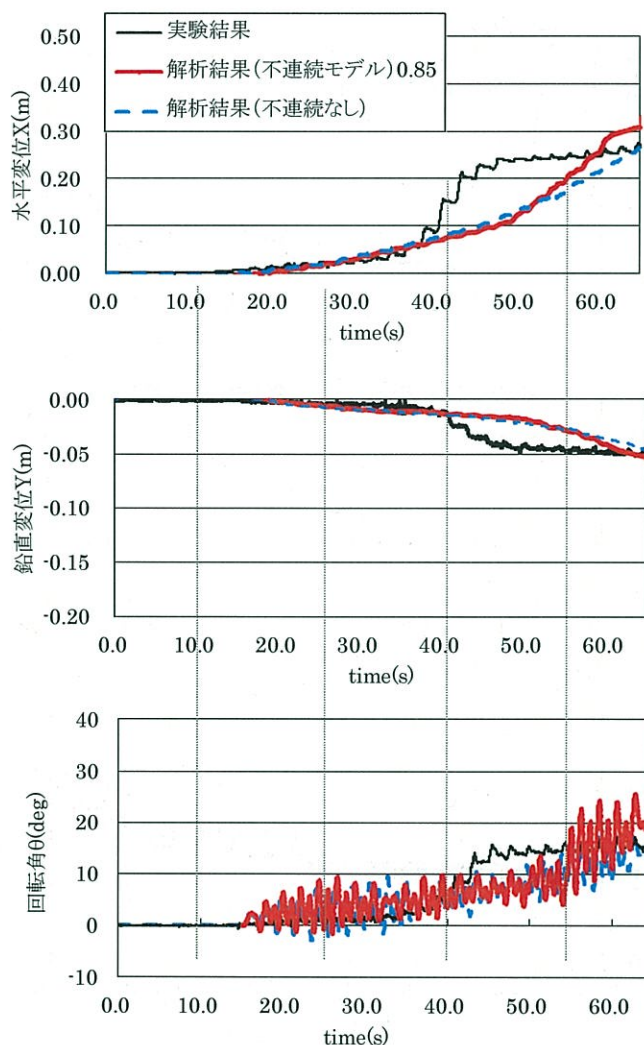


図-5.15 ケーソン中心変位・回転角の比較  
(高マウンド 0.367 m, 肩幅 0.167 m)



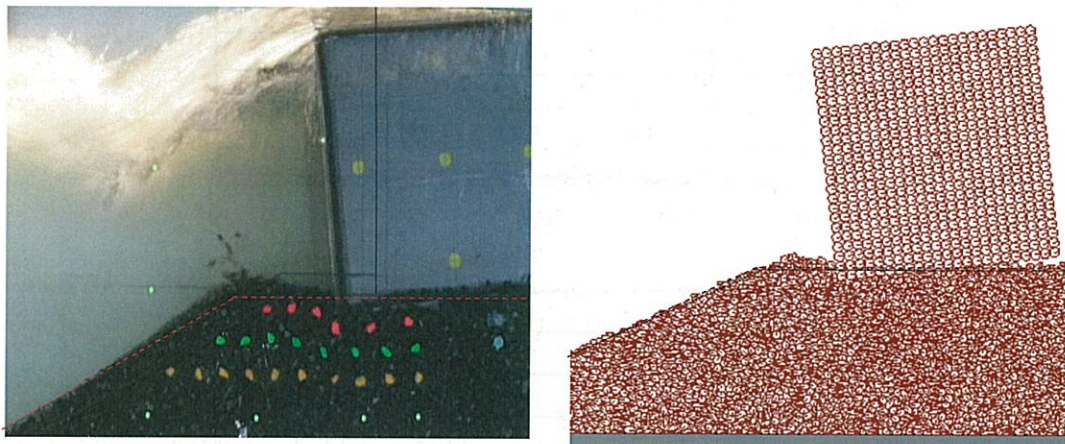


図-5.16 ケーソンおよびマウンド破壊状況の比較  
(左：実験，右：数値計算，実験開始 40 s)

#### (6) 解析結果 4 (高マウンドで捨石粒径が大きい場合)

高マウンドで捨石粒径が大きい場合について，図-5.17に粒径大のケースにおけるケーソン水平変位の比較を示す．なお，本ケースの実験においては捨石の粒径を大きくしてマウンド剛性を高めたことで，同じ外力作用下でもこれまでとは大きく異なり，ケーソンの変形は殆ど発生していない．また，回転や沈下量も同様に殆ど発生していない．それらの傾向は，解析でも同様の傾向を捉えられている．

図-5.18に押波時のケーソン底面反力の比較を示す．実験においては，後趾よりもやや内側（0.05 m 付近）において荷重のピーク値が現れるとともに，初期の P-1 の段階から後し付近へ荷重が偏る傾向を示している．荷重の偏りは，図-5.13に示したマウンド低のケースよりも顕著になっている．解析では P-1 で，ケーソン中央付近などの箇所にもややばらつきを持った底面荷重が作用しているものの，時間の経過とともに，概ね実験値と同様の地盤反力の分布特性に近づきつつある．初期のマウンド捨石のばらつきや，複数要素に区分けした要素に接触するかしないかなどのケーソン各要素への初期接触の有無により，最初はややばらつきが生じているものの，時間の経過とともにケーソン後趾への荷重集中傾向を概ね再現できている．



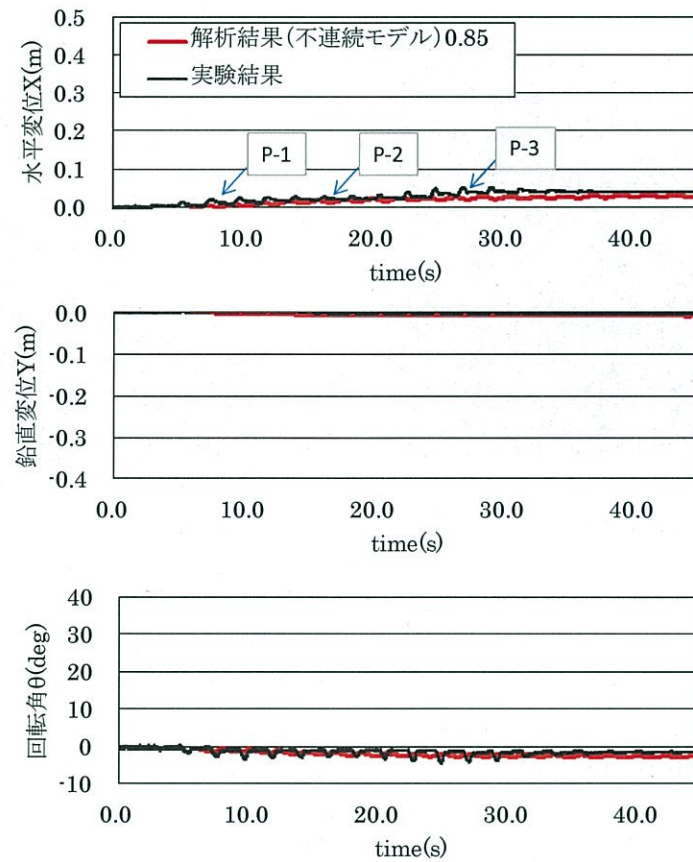


図-5.17 ケーソン中心変位・回転角の比較  
(高マウンド0.367 m, 肩幅 0.167 m, 捨石粒径 4号)

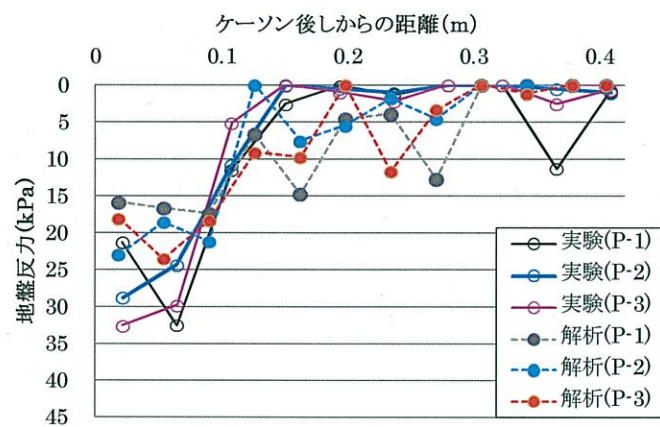


図-5.18 ケーソン地盤反力の比較  
(高マウンド0.367 m, 肩幅 0.167 m, 捨石粒径 4号)

本節では、混成防波堤のケーソンの回転やマウンドの崩壊を伴う大規模変形破壊を再現できる解析手法について、水理実験結果を対象に精度の検討を行った。DEM法をベースに付加質量の設定や、急激なマウンド崩壊過程をより再現できるように摩擦係数（スライダー）の不連続モデルを導入するなどの改良を行い、その適用性を検証した。その結果、粒子間摩擦の上限値を要素速度に応じた不連続化を考慮する上では、スライダーの上限値を静的値の 0.85 倍とすることで、実験結果の再現性が大きく向上することが得られた。以下では、本節で改良した手法を用いて気仙沼大川北部へ対策工を講じた場合の津波に対する防波堤の被害評価を行う。

### 5.3 津波防波堤の倒壊被害評価 ～気仙沼大川北部を対象として～

#### 5.3.1 津波防波堤の仮定条件概要

本節では、気仙沼市大川北部地点を対象とした津波防波堤の破壊評価を行う。第 2 章、第 3 章および第 4 章で明らかにしたように、L1 地震津波、L2 地震津波ともに気仙沼市は市内の大部分が浸水し、漁船の多くは漂流・散乱し、さらには 60 歳以上の高齢者は地震直後に避難を開始しても人的被害を回避できないという影響評価を示すなど、現状では津波に対する被害を回避することが非常に困難である解析結果が得られた。そこで、気仙沼地点全体の防災力向上を図る目的で、津波浸水被害を抑えることが可能となる沖合の津波防波堤を設置する案を仮定する。設置位置は、ケーソン式構造の防波堤が採用される標準的な水深 -15.0 m 程度の海域を選定する。

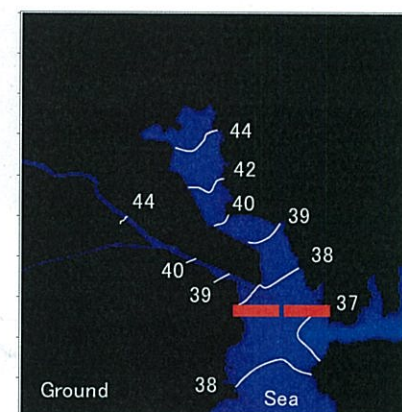
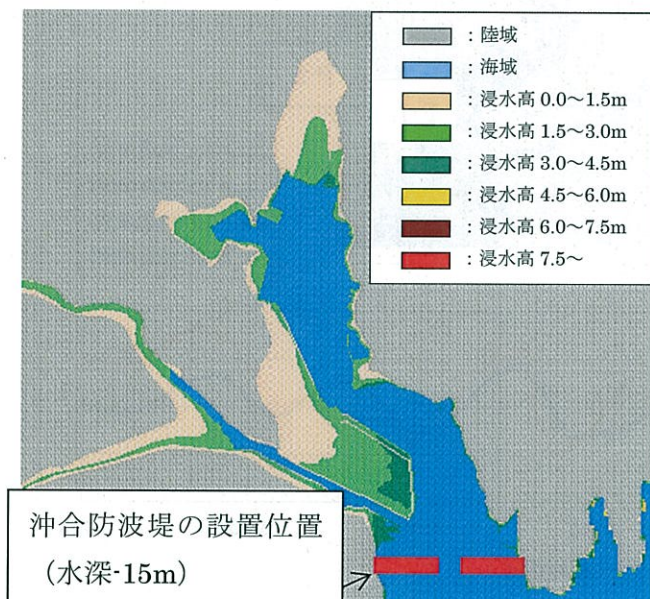


図-5.19 防波堤の設置位置（浸水高は防波堤の無い状態での L2 地震津波）



津波防波堤の諸元決定方法は、経済性や現状の被災地の震災復興計画の動向を踏まえ、L1 地震津波に対して静的に安全率を確保できる断面を構築する方針とする。津波防波堤の設計においてはまず、防波堤設置位置の津波最高水位（進行波）を元に、谷本ら<sup>6)</sup>の方法により津波波力を評価する。次に、L1 地震津波の波力に対して滑動安全率（1.2 以上）および転倒安全率（1.0 以上）を満足する防波堤の幅、高さ等を決定する。図-5.21 に設計後の防波堤の諸元を示す。また、表-5.3 に地震津波毎の安全率を示す。なお、防波堤の規格の決定における津波水位は 図-5.22 に示す津波浸水解析の結果における津波防波堤設置延長上 2 地点の水位時刻歴の時系列平均値を用いる。なお、図-22 は津波防波堤のない状態における津波浸水解析の結果による水位変動の時刻歴を示している。L1 地震津波のケースにおいては抽出地点の違いによる水位変動の差が生じていない、一方で L2 地震津波では、押波ピーク周辺の水位に多少の相違が見られている。

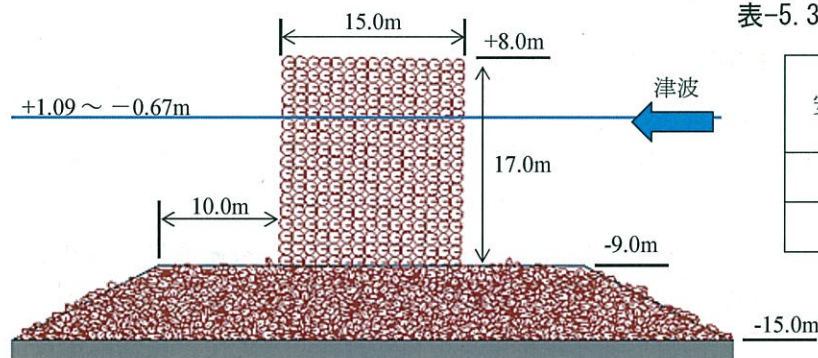


表-5.3 設計結果における安全率

安全率	L1 地震津波	L2 地震津波
滑動	1.25	0.40
転倒	1.34	0.63

図-5.21 津波防波堤の諸元

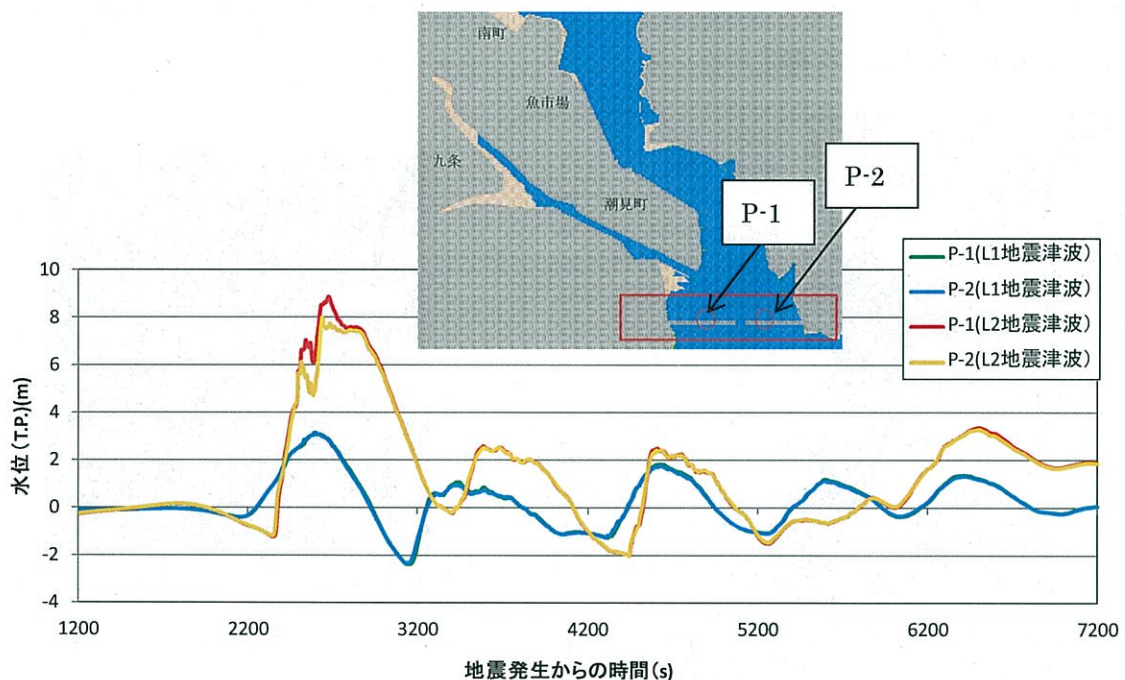


図-5.22 水位抽出地点および防波堤設置位置の津波水位時刻歴



### 5.3.2 津波防波堤の被害評価 (L1 地震津波, L2 地震津波)

#### (1) L1 地震津波に対する被害

始めに L1 地震津波についての検討を行った。図-5.23 および 図-5.24 に L1 地震津波に対する津波防波堤の被害予測の解析を行った結果を示す。なお、解析では 図-5.22 より、地震発生から 2,000 s から 7,200 s の時間帯を対象としている。また、捨石マウンドの規格は、現実性を考慮の上、300~500kg/個の石材と設定する。

図-5.23 に示す、解析前後の津波防波堤の姿図からは津波の来襲による変化が殆ど見られていない。ケーソンの水平変位、沈下量および回転角の時刻歴図を 図-5.24 に示す。ケーソンの変位は、第一波目の津波ピーク前後（地震発生から約 35 分後付近）に数ミリ程度の水平変位が生じるのみであり、沈下や回転の発生は殆ど生じていないことがわかる。以上から、本検討の結果からは、本提案の津波防波堤は、L1 地震津波に対しては倒壊の可能性は極めて低いと結論付けられる。

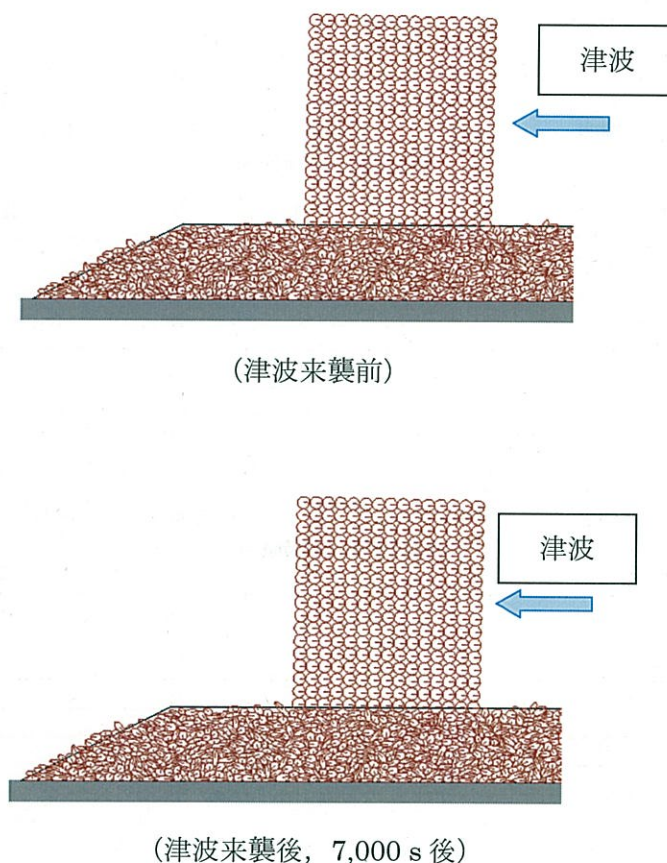


図-5.23 津波防波堤の姿図

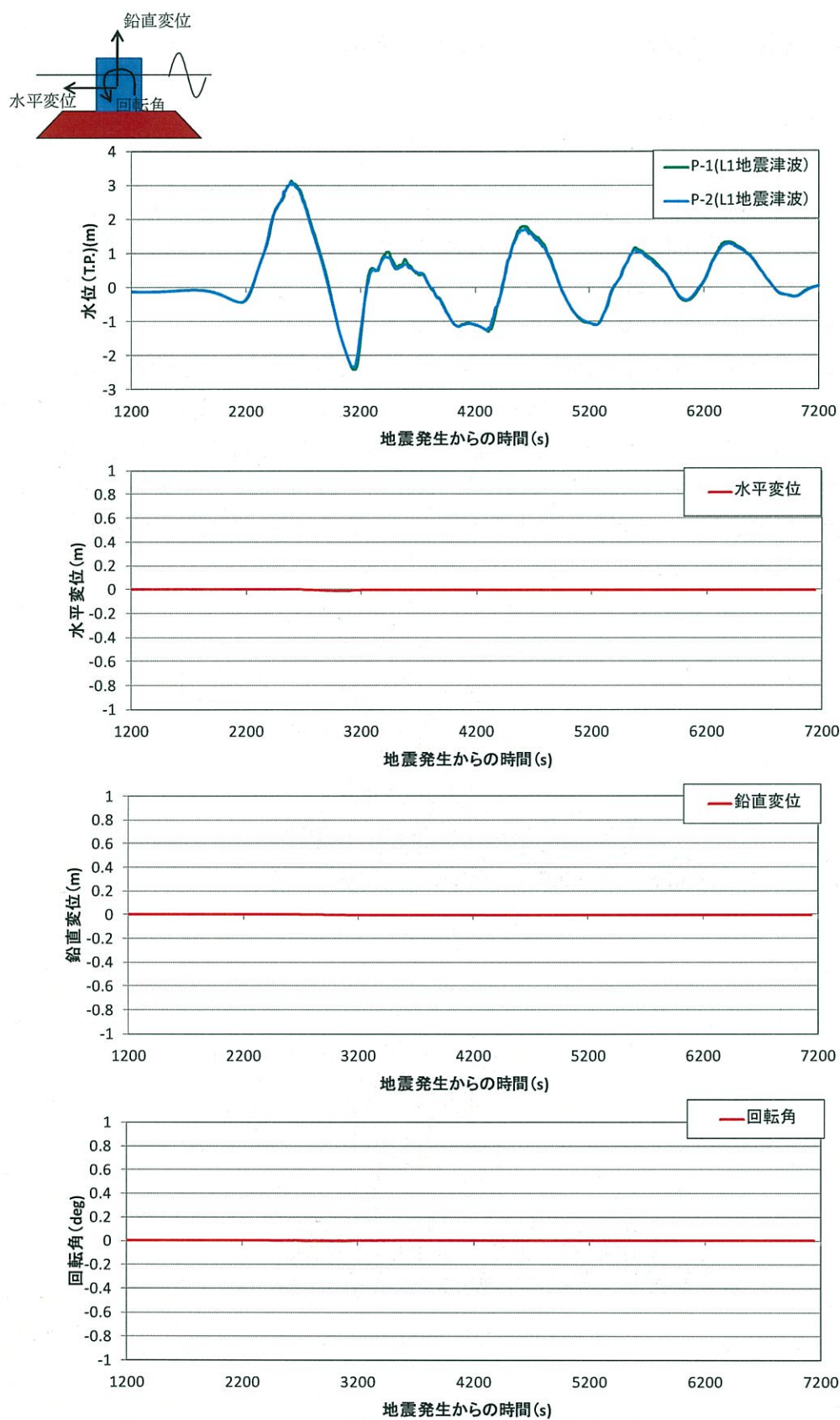


図-5.24 津波防波堤の水平・鉛直変位および回転角 (L1 地震津波)

## (2) L2 地震津波に対する被害

ついで L2 地震津波に対する解析を行った。図-5.25 および 図-5.26 に L2 地震津波に対する津波防波堤の被害予測の解析を行った結果を示す。なお、解析は L1 地震同様に、地震発生から 2,000 s から 7,200 s の時間帯を対象としている。図-5.25 に示す、解析前後の津波防波堤の姿図からは津波の来襲によってケーソンは大きく転倒、沈下することがわかる。また、図-5.26 に示す、ケーソンの水平変位、沈下量および回転角の時刻歴図からは、第一波目の津波ピークになるにしたがって（地震発生から約 35 分後付近）最初に水平変位が卓越し始め、背後の肩幅が狭くなるにつれて、回転と沈下が急激に発生し、やがて転倒に至る結果を示している。また、回転、沈下が顕著になるタイミングは津波水位の最大値を越えた後の引き波に転じる時点であり、背後領域への浸水を低減するという観点からでは、沖合津波防波堤は一定の防災施設としての効果が発揮できていると考えられる。本検討の結果からは、本提案の津波防波堤は、L2 地震津波に対しては倒壊に至る結果となる。

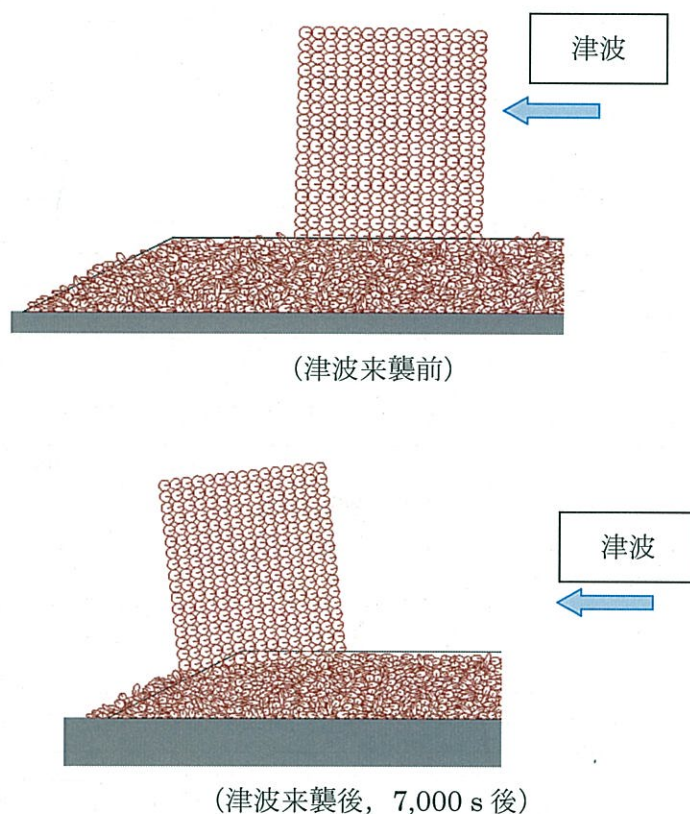


図-5.25 津波防波堤の姿図



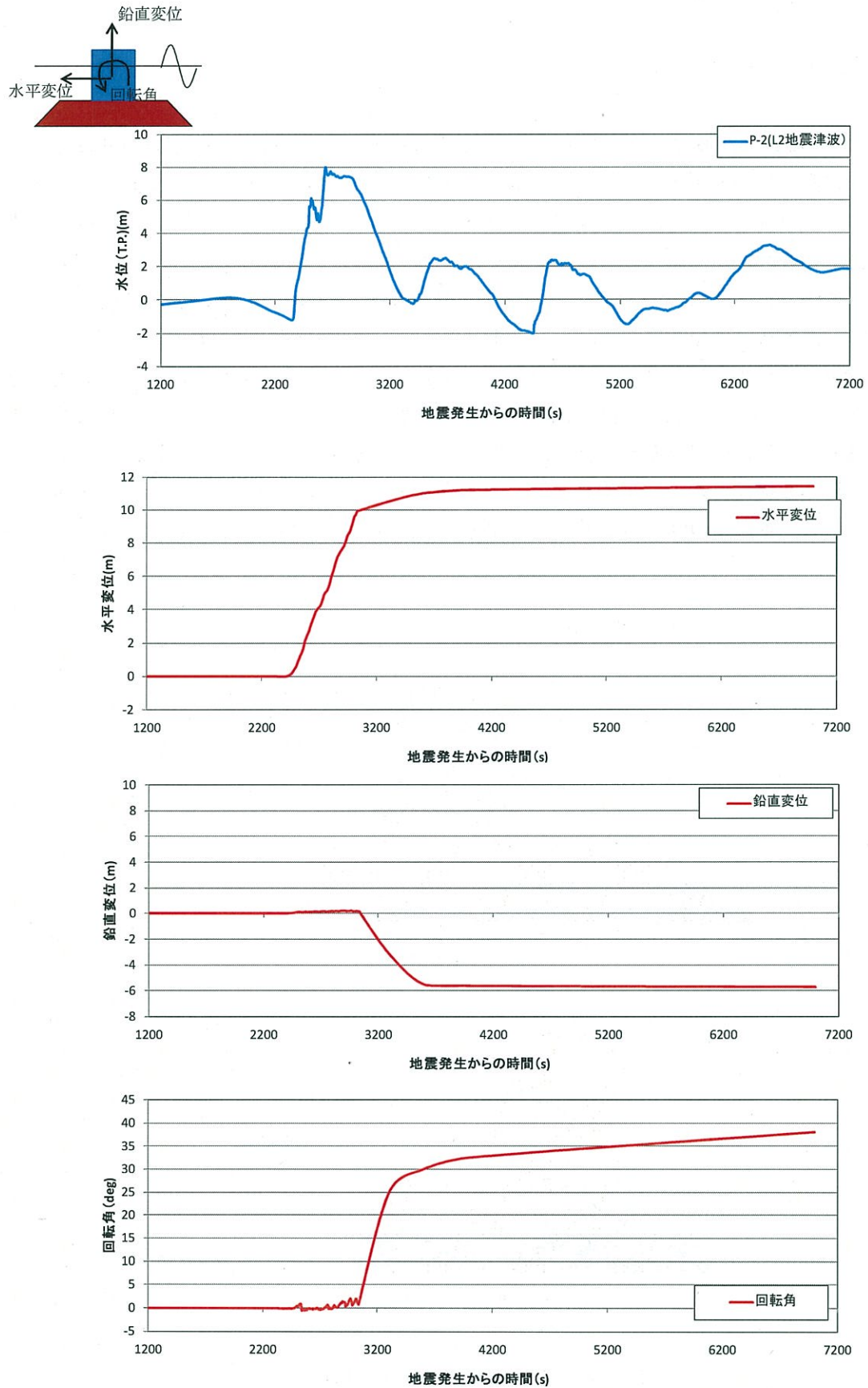


図-5.26 津波防波堤の水平・鉛直変位および回転角 (L2 地震津波)

## 5.4 結論

本章では、防波堤の定量的破壊を再現する解析コードについて述べた。解析コードは、捨石同士のかみ合わせを比較的再現可能な楕円要素モデルに基づく DEM 法をベースにし、①ケーソン要素の複合剛体モデル化と付加質量の改良、②要素同士のせん断方向力に適用するスライダー（粒子間摩擦）のパラメータ値の不連続化を新たに提案し、高度化を図った。構築した解析コードは、水理模型実験結果との比較により既往の手法よりも防波堤の水平変位や沈下量、回転角をより良好に再現可能であることが確認された。

次に、得られた解析モデルを気仙沼大川北部地点を対象に、沖合津波防波堤を設置した場合の L1 地震津波、L2 地震津波に対する防波堤の大変形破壊解析を実施し、破壊の有無やそのメカニズムについて検証を行った。その結果、L1 地震津波に対しては数 mm 程度のケーソンの水平変位のみが発生する結果であった。一方、L2 地震津波に対しては、数 m 程度の水平変位が発生した後に、背後マウンドの隆起を伴ってのケーソンの沈下・傾斜が急激に発生し、やがてケーソンが転倒するまでに至ることがわかった。このような場合においても沖合津波防波堤は一定の防災施設としての効果が発揮できていることを明らかにした。

## 参考文献

- [1] 後藤仁志, 酒井哲郎: 粒状体モデルによる saltation・sheetflow 共存域の数値解析, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.486-490, 1997.
- [2] 高山知司, 高橋通夫: ケーソンを単一構造とした個別要素法による混成堤の挙動計算, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.841-845, 2006.
- [3] 目黒公郎, 伯野元彦: 粒状体シミュレーションによるコンクリート構造の破壊解析, 地震研究所彙報, vol.63, 東京大学地震研究所, pp409-468, 1988.
- [4] 下迫健一郎, 高橋重雄: 期待滑動量を用いた混成防波堤直立部の信頼性設計法, 港湾技術研究所報告, 第 37 巻, 第 3 号, 46p., 1998.
- [5] 宮田正史, 吉田誠, 安野浩一郎: ケーソン式防波堤の大規模変形メカニズムに関する実験的研究, 国土技術政策総合研究資料, No.564, 34P., 2010.
- [6] 谷本勝利, 高山知司, 村上和男, 村田繁, 鶴谷広一, 高橋重雄, 森川雅行, 吉本靖俊, 中野晋, 平石哲也: 1983 年日本海中部地震津波の実態と二, 三の考察, 港湾技術研究所資料 No.470, pp.299, 1983.



## 第6章 地震津波に対する減災の評価

本章では、これまでの第2章から第5章において構築した個々の津波被害評価技術を用いて、津波災害に対する減災達成への活用について記述する。冒頭では、津波減災の定義や意義などについて整理し、次に気仙沼大川北部地点を対象にした減災効果を果たすための合理的な検討を試行的に行う。最後に気仙沼大川北部地点における検討事例を通じて本研究において構築した技術が減災達成を果たす上で有効な総合評価手法となり得ることについて記載する。

### 6.1 減災評価法の概要

#### 6.1.1 減災の概要

東日本大震災における津波の浸水高および被災の甚大さをきっかけに津波防災に対するアプローチの方法について考え直すべき時期がきている。これまでの我々土木技術者の研究は“防ぐため”の技術を重視しがちであり、“防ぐためのものが限界を越えたらどうなるか、想定を超えた外力が来襲したらどうなるか”という研究意識が希薄であった。また、防災対策を行う上で重要な役目を担う、きわめて高い防潮堤や防波堤などは、経済性、利便性、ならびに景観など日常生活に支障を来すなどのイメージや指摘があり、施設の重要性が十分に理解されない気運にあったと思われる。そのような中、今回の震災により減災の重要性が一層大きく指摘されはじめている<sup>1)</sup>。減災の概念は、永松<sup>2)</sup>により、以下のように要約されている。

1. 1973年の第1次オイルショック以後1980年代の初頭の時期に、それまで1960年代の初めから10年余りも続いた高度経済成長期が終焉をむかえ公共部門の財政が悪化する中で、国土保全の考え方もダムや堤防や遊水地などハードな治山・治水施設を強化しても水害を完全になくすことはできないとする、いわば“水害をなくす”ということから“被害を軽減する”という発想への転換の必要性が認識され始めたこと、つまり、一定の被害発生は認めた上で災害の程度を軽減しようとする「減災」の概念が打ち出されたこと。

2. 住民の生命・財産を守るための第一義的な対策は住民自らや地域によって行われるべきで、それを超えた時に初めて行政が支援するという、いわば「公助」・「共助」・「自助」の概念が確立されたものと考えられること、とある。また、本格的にその概念が一般化されたのは阪神・淡路大震災<sup>3)</sup>の体験から生まれたものとの指摘もあり、如何なる対策をとったとしても被害は生ずるという認識のもと、災害時において被害が最も生ずる課題に対して、限られた予算や資源を集中的にかけることで、結果的に被害の最小化を図ろうという

理念であるとの定義化もされている。津波だけでなく、高潮や洪水、地震、雷などのリスクに対する備えのあり方であり広義な意味を持つようである。

減災の意義については、「災害」の構造を踏み説くことにより明確になる<sup>5)</sup>。提案されている「災害」規模とその程度を規定する構成要因の相互関連と「減災」達成までのプロセスの一例を図-6.1に示す。「災害」は地域社会の基盤となる地形や地質など自然環境に関する“素因”と地域社会に災害を引き起こす原因となる自然現象の作用の強さで定まる“誘因”，そしてその地域社会の土地利用状況、建物や各種インフラの脆弱性の程度や道路・公園などの公共空間の狭小性に係わる“被害拡大要因”，さらに、これらの地域社会の持つ欠陥を事前に施策や対策の実行によって耐災性を高める効果を表す“被害抑制要因”の四つの因子から、その規模や程度が定まることになる。また、同図に示したように、「減災」の概念は「災害」の規模や程度の軽減を意味するものであり，“被害拡大要因”と“被害抑制要因”との力関係によってその程度や効果が規定されることになる整理されている。

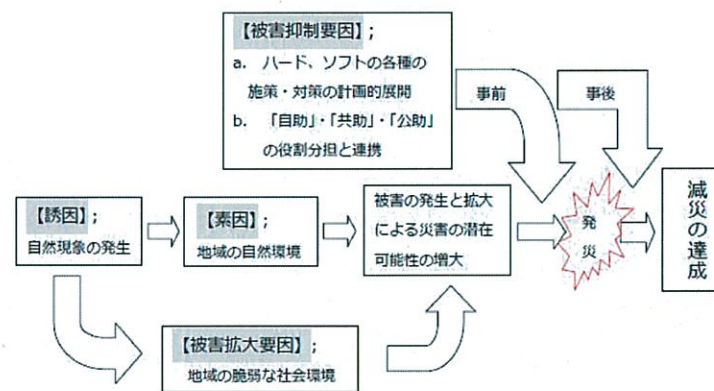


図-6.1 災害の構造と減災のプロセス<sup>5)</sup>

自然災害に対する「減災」の達成には、図-6.1に示す災害の構造に係る要因のうち、【被害抑制要因】を地域の【素因】や【被害拡大要因】の状況を適切に勘案して、効果的な施策や対策となるようにその展開をPDCA（Plan-Do-Check-Action）ループに乗せて計画的にマネジメントしていくことが必要となる。すなわち、総合的な“減災マネジメント・システム”の展開には、

- (1) 発災前後で関連づけての被害抑制要因となる必要な施策・対策の項目とそれらの内容の具体化（効果的な対策方法の決定）
  - (2) 上記(1)の施策・対策の実行状況のマネジメント手法の確立（対策効果の検証）
  - (3) 行政システムの受け皿となる「地域防災計画」の内容の見直し（ソフト対策）
- などの課題を解決しなければならない。



一般的に”被害抑制要因“を構成する施策・対策内容は、発災の事前と事後に分けられる。事前の施策・対策は、(1) 被害抑止、(2) 被害軽減、(3) 災害予知と早期警報、の3つに、事後のものについては、(1) 被害評価、(2) 災害対応、(3) 復旧、(4) 復興の4つにそれぞれ大別、分類される。これらの実行状況については、事前の施策・対策はリスク・マネジメント、事後のものはクライシス・マネジメントによって進捗管理や実施内容の評価などを行う必要があると提言されている。リスク・マネジメントは未だ起きていない事象に対して、それが生じた際の被害を予防し軽減するため、対策を選択し、それらの実行状況を管理するための手段であるのに対し、クライシス・マネジメントは起きてしまった被害に対して、時々刻々の状況や制約条件が変わっていく中で被害の拡大を防ぐとともにそれらを最小限に留め、迅速かつ的確な復旧・復興を推進させるための管理・運営の手段である。また、この二つのマネジメントの円滑な実行には情報共有とコミュニケーションが関係者間での確かつ迅速に行われることが不可欠であると指摘している。

以上が、減災の意義および減災マネジメントの確立に至るまでの全体像、もしくは理想的なシナリオである。減災を果たすプロセスにおいては、減災マネジメントを計画的に推進することが有効であるとともに、被害抑制要因における発災の事前予測を行うことが非常に重要なウェイトを占めている。具体的には、事前の対策における被害抑止、被害軽減および事後対策における被害評価について進めることが最も重要である。そして、それらにより得られた結果、情報を「公助」・「共助」・「自助」の体制構築のために、情報提供、公開や相互のコミュニケーションの推進により、事前予測結果に基づくソフト手法の充実化につながってくる。

対策方法の列挙による計画に留まらず、総合的な減災マネジメント・システムを展開していくには、プロジェクトマネジメント手法として広く用いられる手法が防災の分野でも効果的であるとの指摘がある<sup>6)</sup>。図-6.2 および 図-6.3 にこれらの概念図を示す。つまり、図に示すようなプロセスで「減災」マネジメントを具体的に推進することが有効であり、実践すべきである。具体的には、

- (1) 「減災」の「あるべき姿」を実現するための目標とする対策【G : Goal】を明確に描き、また「ありのままの姿（現在の取組み状況）」【P : Present】を評価する。
- (2) 「あるべき姿」と「ありのままの姿（現状の姿）」の差分=【G】-【P】が、これから「実施すべき対策」の内容となる。
- (3) (2) で抽出された「実施すべき対策」に必要な予算・時間・効果を評価し、事業計画化していき、これらのプロセスを複数年度の計画で実践することにより、PDCA のマネジメント・サイクルを実行し、合理的な進捗管理を行う。また、地域の減災の「あるべき姿」を形成して行くプロセスにおいては、実施した対策後に更新される「ありのままの姿」を随時共有することにより、地域の住民や NPO、企業の関係者を巻き込んだ議論がより効果的・実践的になる。そして、彼らの参画・協働により「共助」や「自助」の形成がより明確なものになる。



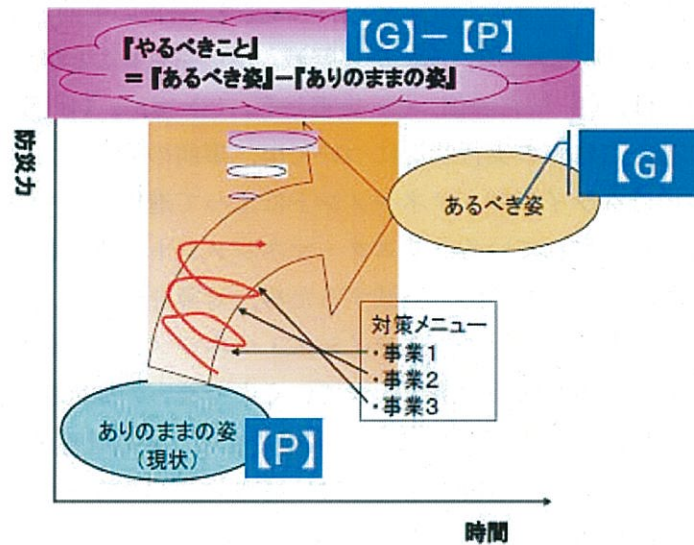


図-6.2 減災マネジメント・システムの展開プロセス ⑥

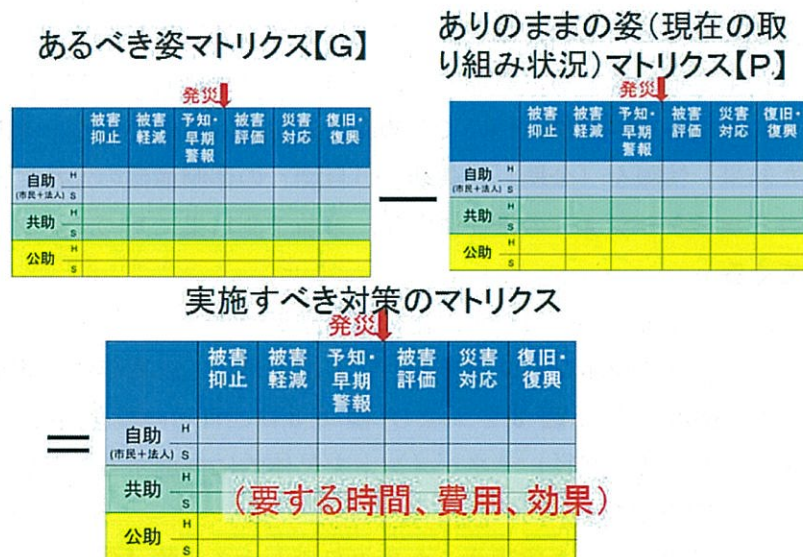


図-6.3 マネジメント・システムのマトリックス

## 6.1.2 減災へのプロセスにおける課題とその解決策

6.1.1 節で説明した減災マネジメントを具体的に推進するためには、「あるべき姿」を設定すること、「ありのままの姿」を客観的に評価することが最も重要である。「ありのままの姿」、例えば、現状における被害予測や、それに基づく災害脆弱地域等の具体的把握などである。しかし、第1章でも記載したように、東日本大震災の経験から津波被害は多岐に及ぶため、津波被害に対して「ありのままの姿」を現実に即したものにするためには多岐に渡る被害内容を網羅した検討が重要である。そのため、第2章から第5章において構築

した、以下の 4 つの被害予測手法を総合的に用いることで既往の研究にはない、より現実  
に即した「ありのままの姿」を捉えることが可能であり、対策構造物による軽減・抑止効  
果の評価も可能となる。

1. 津波の伝播による浸水被害
2. 漂流物による乗り上げ・突被害（船舶漂流被害）
3. 避難を考慮した浸水に伴う人的被害
4. 防波堤・防潮堤などの防災施設の破壊被害と破壊に伴う浸水被害の増幅化

さらには、第 5 章で構築した防波堤などの防災施設の定量的破壊解析を用いて、限界を  
超えた外力作用による背後域の被害拡大化についても言及が可能となる。その他にも、避  
難所の増設による人的被害の軽減・抑止効果、防波堤・防潮堤などの防災施設の設置によ  
る浸水・船舶漂流被害の軽減・抑止効果の定量的把握などが考えられる。

「あるべき姿」としては、地域や自治体により様々な選択があると思われるが、今回の  
震災を踏まえると、ある一定レベルまでの地震津波に対してはハード対策により浸水被害  
を抑制し、物理的な資産や人命の損害を完全に防ぐことが求められている。また、一定レ  
ベルを越えた規模に対しては、物理的損害は許容しつつもソフト対策との併用により人的  
被害の発生を抑制するという考えが重要視されつつある。

### 6.1.3 津波被害に対する減災へのアプローチ

津波被害に対する減災達成のためのアプローチ方法としては、中央防災会議などで提唱  
されている考え方を参考にする。表-6.1 に津波レベル毎の耐災レベルの設定についての例  
を示す。すなわち、津波減災を推進する上での「あるべき姿」とは L1 地震津波に対しては、  
内地への浸水を防ぐことであり、L2 地震津波では人的被害の発生を防ぐこととなる。なお、  
今回の未曾有の東日本大震災で得られたことは、津波から人命を守ることは、可能な限り  
海岸線から離れた高台に避難するというで物理的に可能となることが、避難の実態調  
査などからも明らかになっている<sup>2)</sup>。これは地震などによる建物の倒壊とは被害の性質の異  
なるものであり、避難を行うことで、どのような津波であっても人命を可能な限り守るこ  
とができることを示しており、十分に達成可能なレベル設定であると考えられる。

表-6.1 耐災レベル<sup>5)</sup>

耐災レベル	外的事象	被災状況
レベル 1	レベル 1 津波、高潮（台風）、豪雨に よる洪水の影響を適切に組み合わせて用 いる	防災（人命、財産を完 璧に守る）
レベル 2	レベル 2 津波、高潮（台風）、豪雨に よる洪水、地盤沈下等全ての影響を組 み合わせて用いる。	減災（人命は守る）
超レベル 2		減災



## 6.2 減災のための対策法とその評価 ～気仙沼大川北部を対象として～

本節では、第2章から第5章において構築した、妥当性を確認した解析手法を用いて、気仙沼大川北部地点をケーススタディとして減災の達成に資すると考えられる対策案の提案と、それによる被害予測・軽減評価を行う。なお、気仙沼大川北部地点周辺の地形特性については、第2章、2.2.2節に記載している。

### 6.2.1 目標レベルの設定 ～あるべき姿～

目標レベルの設定（あるべき姿）については、表-6.1に記述した内容を参考に設定する。表-6.2に気仙沼大川北部地点における地震津波レベル毎のあるべき姿と具体的な解析結果の目標イメージ案を示す。

表-6.2 気仙沼地点における検討イメージ（あるべき姿）

地震津波レベル	あるべき姿	イメージ	具体的な予測目標
L1 地震津波	防災	浸水・人命を守る	浸水被害予測解析により浸水が生じない、もしくは浸水領域がほぼ0に近い(当然、人的被害も生じないと想定)。
L2 地震津波	減災	人命は守る	浸水被害予測解析で浸水が生じることはあっても、避難行動解析において、徒歩・車両によるどちらの避難手法を用いても30分以内に避難を開始すれば逃げ切れる。

なお、L2地震津波における「あるべき姿」に、30分以内に避難を開始するという設定を行った根拠については、村上ら<sup>7)</sup>の避難開始時間の実態調査を参考にしたものである。また、実際には漂流物による被害についても事前に予測する必要があるが、本研究においては気仙沼地点を対象とした試行的な検討であり、あるべき姿の目標において船舶などの漂流に関連する被害項目について設定を行っていないため、船舶の漂流被害の検討は本章では考慮しない。

### 6.2.2 現状における被害リスクの整理 ～ありのままの姿～

気仙沼地点における津波被害のリスクおよびその規模（ありのままの姿）の把握については、第2章から第4章における検討結果を活用できる。表-6.3に被害リスクについてま



とめた解析結果を示す。なお、本章では漂流物の被害については、あるべき姿の評価項目に該当しないため、考察から除外して整理している。なお、人的被害に関する評価においては、最も避難困難となりやすい、徒歩の場合における60歳以上、および車両においては避難車両1,000台の場合の結果を用いる。

表-6.3に示すようにL1地震津波、L2地震津波のケースともに現状では、あるべき姿を満足していないことがわかる。

表-6.3 ありのままの姿の評価

地震津波 レベル	浸水被害	人的被害		考 察
		歩行避難 (60 歳以上)	車両避難 (1000 台)	
L1 地震津波	発生する (最大浸水高) 3m 程度	2 分以降に避難を 開始すると被害 が発生する.	4 分以降に避難を 開始すると被害 が発生する.	あるべき姿を 満足していない
L2 地震津波	発生する (最大浸水高) 8m 程度	地震直後に避難を開始しても被害が 発生する.		

### 6.2.3 実施すべき対策の整理 ～やるべきこと～

事前に被害を抑制する対策としては、ハード・ソフトともに多くの方法が考えられるものの、本研究では、以下の2つの方法による被害抑制効果を検証する。

#### 1. L1地震津波に関する対策

○沖合防波堤施設による浸水被害抑制（防波堤の配置については、第5章に記載）。

#### 2. L2地震津波に関する対策

○沖合防波堤施設による浸水被害抑制。

○高台以外の新たな地点への避難所増設による避難時間の短縮化。

つまり、本研究における事前対策による減災を図る上では、L1地震津波に対しては防波堤のハード施設により浸水被害を抑制し、L2地震津波に対しては、ハード施設だけでは浸水の抑制しきれないため、避難所の増設により人的被害の発生を限りなく抑える意図で提案している。図-6.4に減災達成に向けた検証のフロー図を示す。

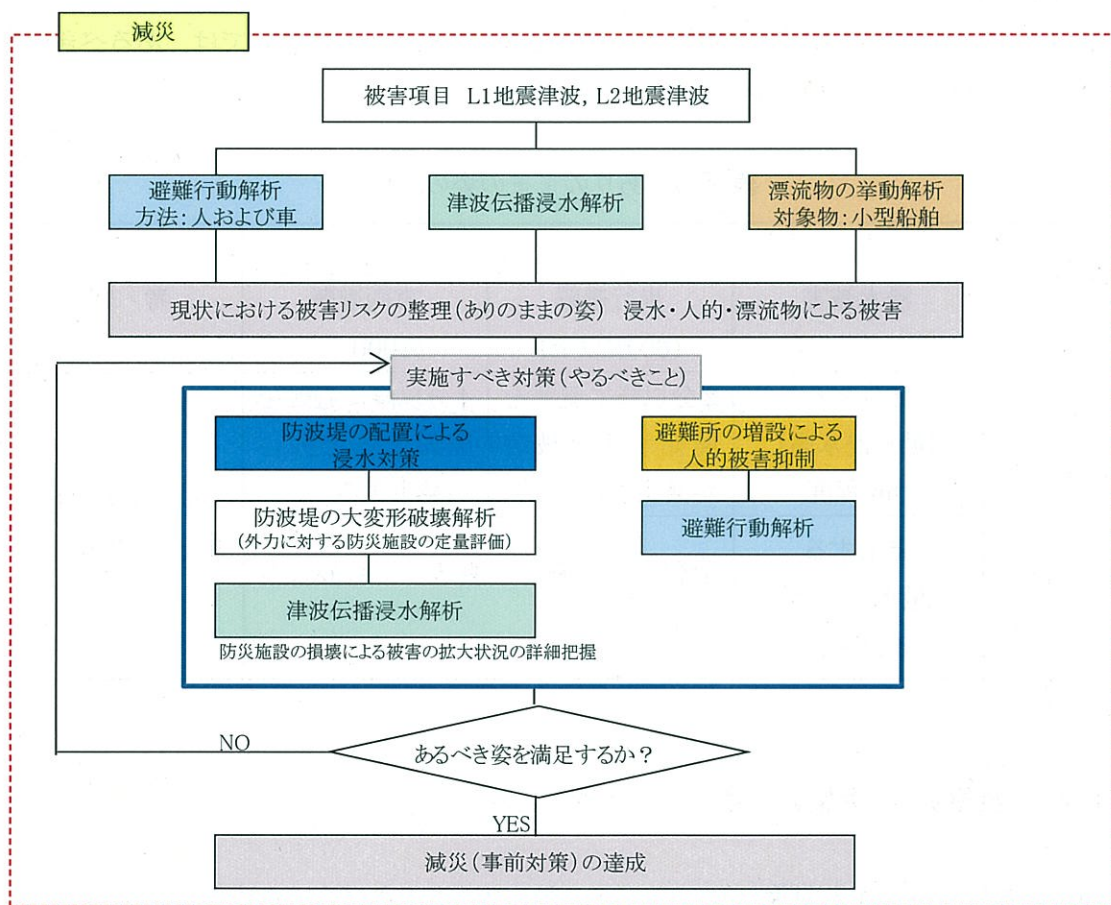


図-6.4 減災達成に向けた検証フロー（気仙沼大川北部地点）

## 6.2.4 津波防波堤設置による減災効果の評価

### (1) L1 地震津波に対する減災対策の評価

L1 地震津波を対象に，沖合防波堤施設による浸水被害抑制効果について検討を行う．あるべき姿の目標値を参考に以下のフローにて減災達成可能かを確認する．図-6.5 に検討フローを示す．

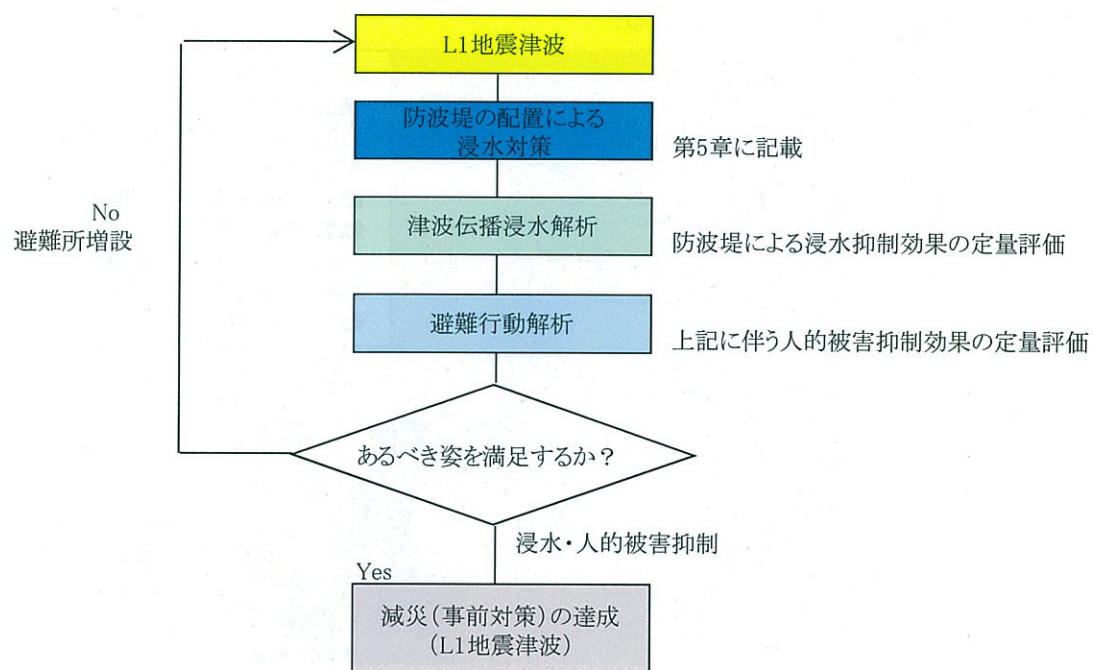


図-6.5 減災達成のための判定フロー (L1 地震津波)



L1 地震津波に対する防波堤設置による津波浸水に与える影響について検討を行う。図-6.6に L1 地震津波に対する防波堤設置後の津波伝播解析を行った結果を示す。また、合わせて対策工のない場合（ありのままの姿）における解析結果を合わせて示す。図-6.6 から、沖合に防波堤を設置することで、気仙沼大川北部地点への浸水をほぼ完全に防ぐことが可能となることがわかる。南町近辺では、0.7 m 以内（避難限界の浸水高）の浸水領域が見られるものの、浸水被害を抑制可能であると考えられる。なお、解析においては、図-6.8 に示す防波堤の鉛直変位の時刻歴を反映させる方法により、津波に対する防波堤の健全性を考慮した浸水被害の評価を行っている。

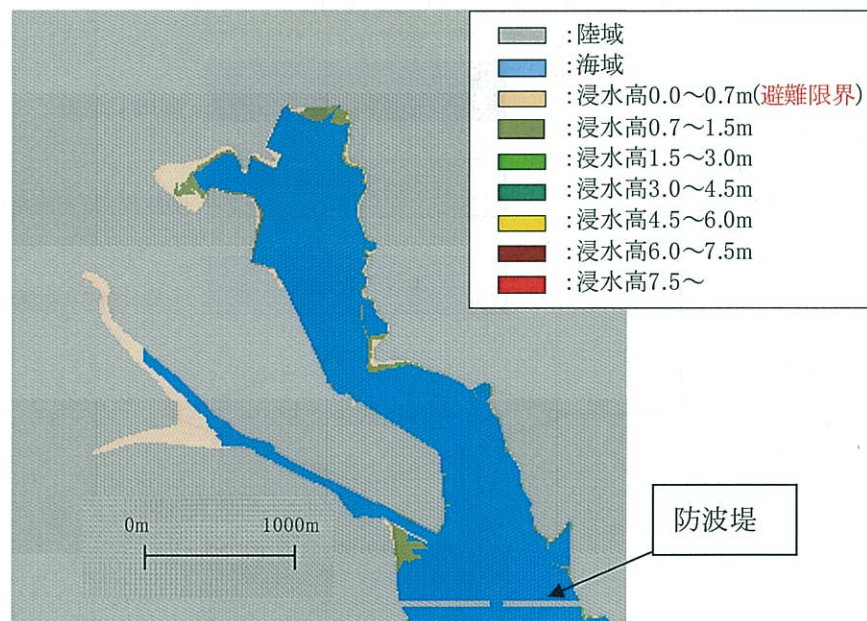


図-6.6 最大浸水領域および最大浸水高（防波堤有，L1 地震津波）



図-6.7 最大浸水領域および最大浸水高（防波堤無，L1 地震津波）

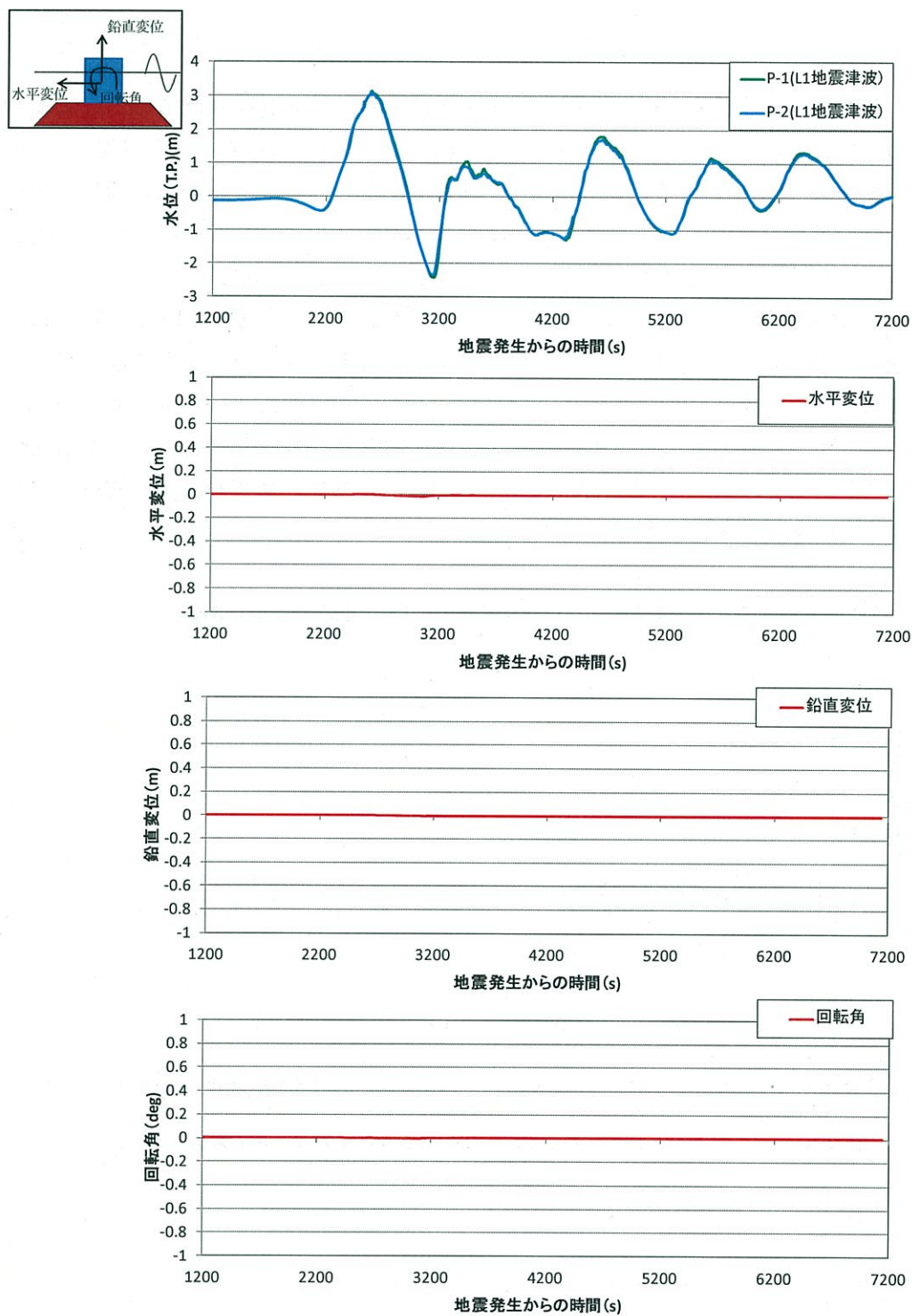


図-6.8 L1 地震津波に対する防波堤の水平・鉛直変位および回転角  
(第5章における解析結果)

提案した仮想の防波堤の津波に対する安定性は、第5章における解析により、L1 地震津波に対しては、殆ど変位や沈下が生じないという結果が得られている。そのため、防波堤の変位を考慮した浸水被害の予測計算においても、L1 地震津波に対しては十分な防災機能を発揮できている。



以上から防波堤の健全性を考慮した浸水被害評価により、防波堤を設置することによって L1 地震津波に対して浸水被害を抑制するというあるべき姿に到達することが得られる。提案した防波堤は、L1 地震津波に対しては殆ど変位や傾斜が生じず、津波防災構造物として十分な機能を保持している。それにより、浸水抑制を成し遂げられている。なお、浸水解析における防波堤の高さ変化は、設置延長すべてを一律に低下させている。

次に、避難行動解析により人的被害の評価を行う。図-6.9、および図-6.10 に避難行動解析結果を示す。図から、浸水被害が生じないため、避難開始時間が遅れることになっても、人的被害が増加する傾向はないことを示している。一部、海岸線付近に初期位置をとる 60 歳以上の徒歩による避難者が、第 1 波到達後（43 分）に避難開始した場合において避難成功しないケースがあるものの、L1 地震津波に対しては、人的被害の観点からでも防波堤の配置によってあるべき姿に到達することが得られる。

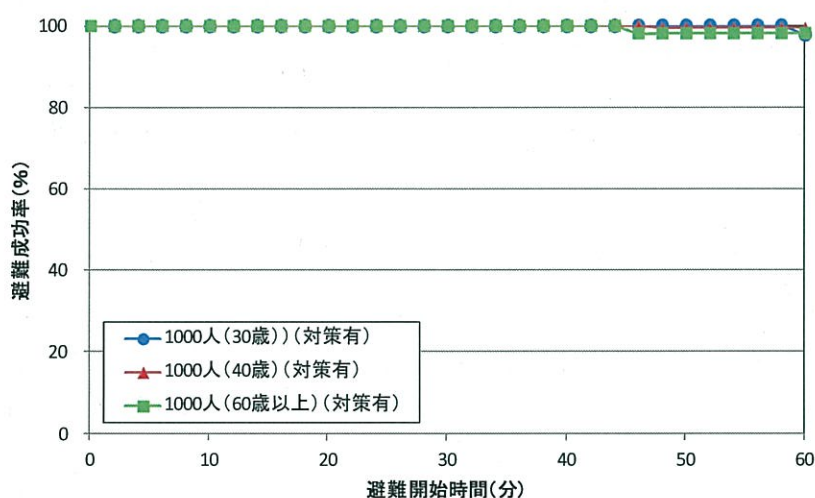


図-6.9 避難開始時間と避難成功率の関係（防波堤有，L1 地震津波，徒歩避難）

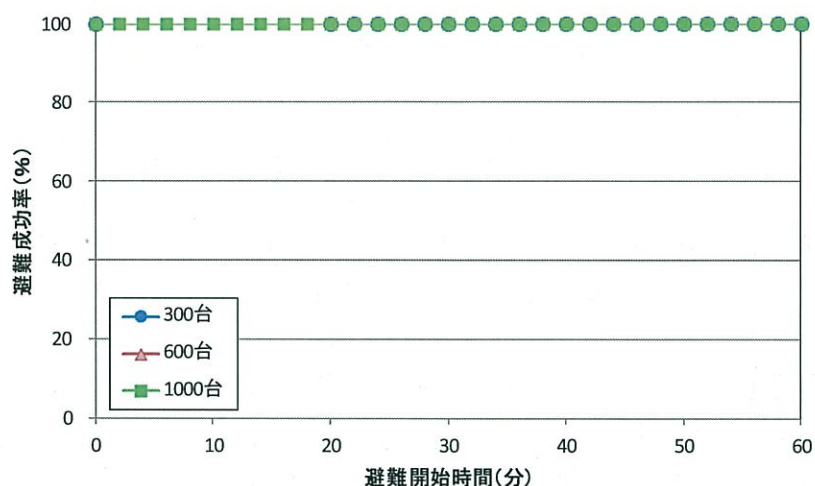


図-6.10 避難開始時間と避難成功率の関係（防波堤有，L1 地震津波，車両避難）



また、車両による避難では、全く被害が生じておらず、本検討からでは L1 地震津波に対しては避難手法に関わらず、想定された対策で十分に人的被害の発生を防ぐことが可能であると思われる。

以上から、気仙沼大川北部地点においては、L1 地震津波に対して提案する防波堤の配置によりその機能を維持しつつ、浸水・人的被害抑制を果たすことが可能であることが確認できる。

## (2) L2 地震津波に対する減災対策の評価

L2 地震津波を対象に、沖合防波堤施設による浸水被害抑制効果について検討を行う。あるべき姿の目標値を参考に以下のフローにて減災達成可能かを本研究により構築した解析手法を用いて確認を行う。図-6.11 に検討のフロー図を示す。

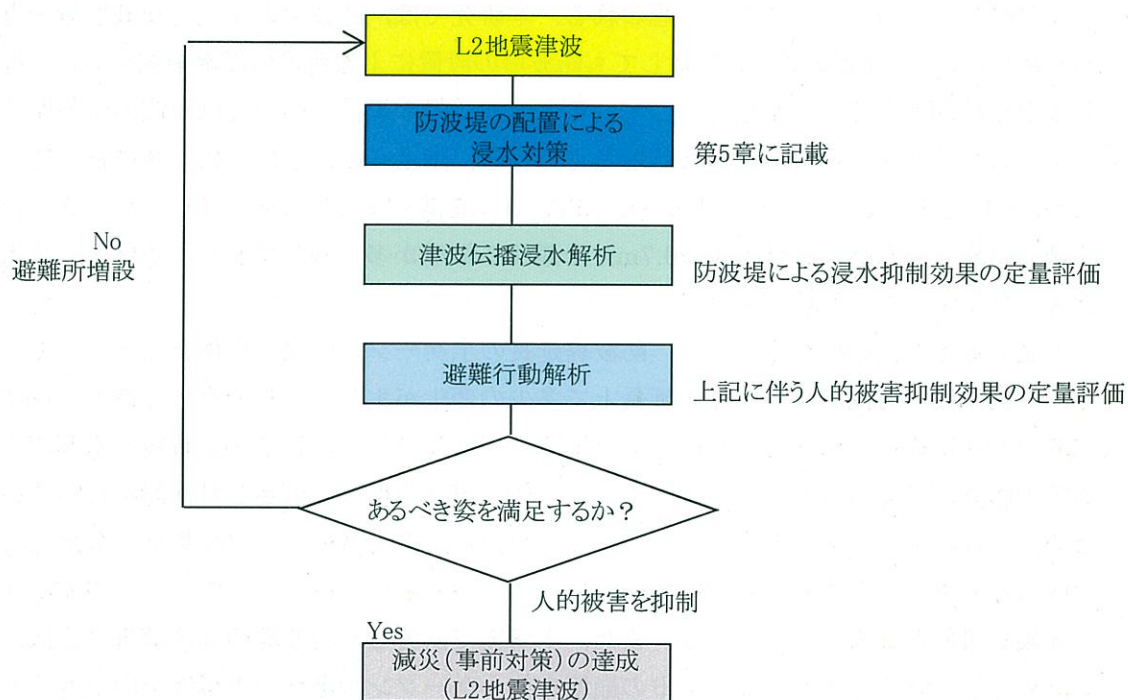


図-6.11 減災達成のための判定フロー (L2 地震津波)

続いて、L2 地震津波に対する防波堤設置による津波浸水に与える影響について検討を行う。図-6.12 に L2 地震津波に対する防波堤設置後の津波伝播解析の最大浸水高、浸水領域の整理結果を示す。図-6.13 に対策工のない場合（ありのままの姿）における解析結果を合わせて示す。また、図-6.14 に別途解析した津波による防波堤の変位回転角の時刻歴を示す。津波防波堤は、津波来襲によりケーソンが除所に水平変位が発生し、水位の最大値を過ぎて引波に転じはじめた時点から、沈下や傾斜を伴う破壊が急速に増加し、やがて水平・鉛直変位の増加が収まり停止する結果を示している。図-6.14 より、沖合の防波堤は最終的には津波により直接的なダメージを受け、防災施設としての役割が大きく低下しているものの、図-6.13 の防波堤のない場合の比較からでは、気仙沼大川北部地点への浸水域、浸水高さを大幅に低減できるという効果が見られる。その要因としては、まず第 1 波目の津波が最も大きい点が挙げられる。このとき、防波堤は第 1 波目の来襲とともに最初は水平変位が卓越し、その後回転や沈下が生じて遮水性能が低下し始める段階的な破壊を辿っており、水位が最大に達した時点では、まだ性能の低下が著しくなっていない、という防波堤変位の時刻歴特性を持つからであると思われる。本研究では、防波堤の定量的な破壊量を考慮した解析により、L2 地震津波に対しても防波堤の設置による背後の浸水領域や高さの抑制効果が比較的大きくなる結果を示しているものの、浸水規模については津波の時刻歴特性により大きく変化する可能性があると考えられる。陸上への浸水は、広領域に及んでいるため、L1 地震津波のケースと異なり浸水被害自体を防ぐまでには至っていない。さらに、陸域では最大浸水高が避難限界（0.7m）を越える領域が多く残っており、依然として人的被害が発生することも想定される。

上記の仮定を詳細に想定すると、防波堤延長の全ケーソンが同じ堤体となるわけではなく、また津波の時刻歴特性も設置延長上で多少の変化が生じる。そのため、個々の堤体は破壊の進展に違いが起き、それにより目地間の隔たりが生じ、目地から背後へ水が流入する等の影響が考えられるが、本研究では、一律の規格の堤体と仮定した検討を行っているため、目地による流入は考慮していない。各堤体の設置水深やケーソン規格、各地点での津波水位の違いなどを考慮した複数断面について破壊解析を行うことで、より現実に即した評価が可能となると考えられる。また、本研究で構築した防波堤の破壊解析手法は、ある決められた外力に対してマウンドの崩壊を伴うケーソンの破壊の再現性を向上させることを目的とした手法である。そのため津波による作用外力の評価については未だ完成とは言えない（例えば、越流による背後マウンドへの直接的な飛散、マウンド内部への浸透流による影響）。より詳細な予測を行うためには、防災構造物の破壊量に大きな影響を与える外力の評価についてもさらなる研究の充実および解析手法の高度化が求められると考えられる。



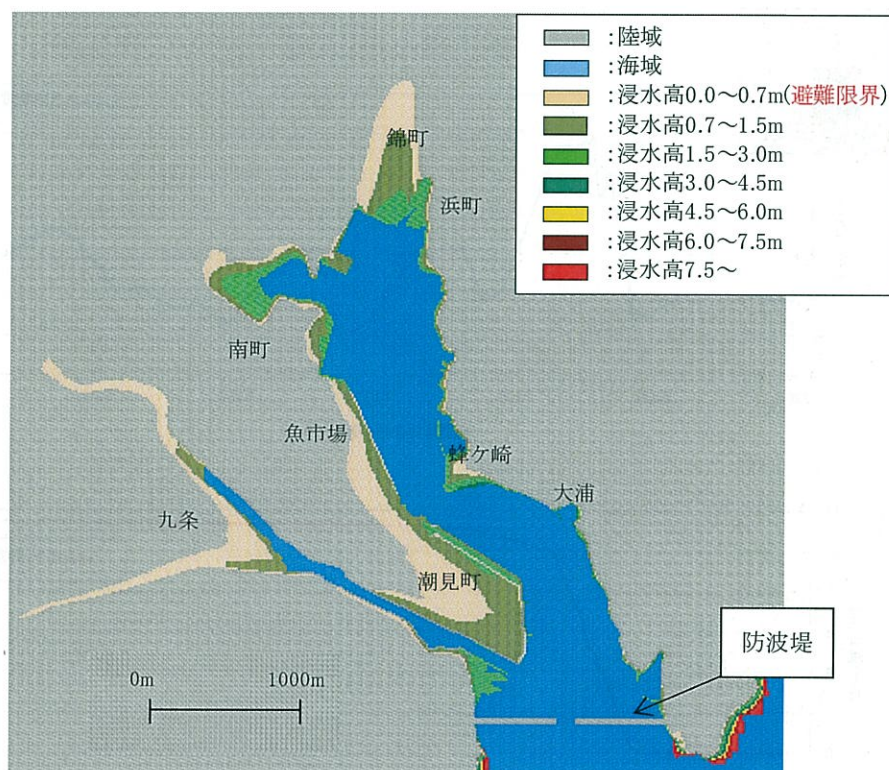


図-6.12 最大浸水領域および最大浸水高（防波堤有，L2 地震津波）

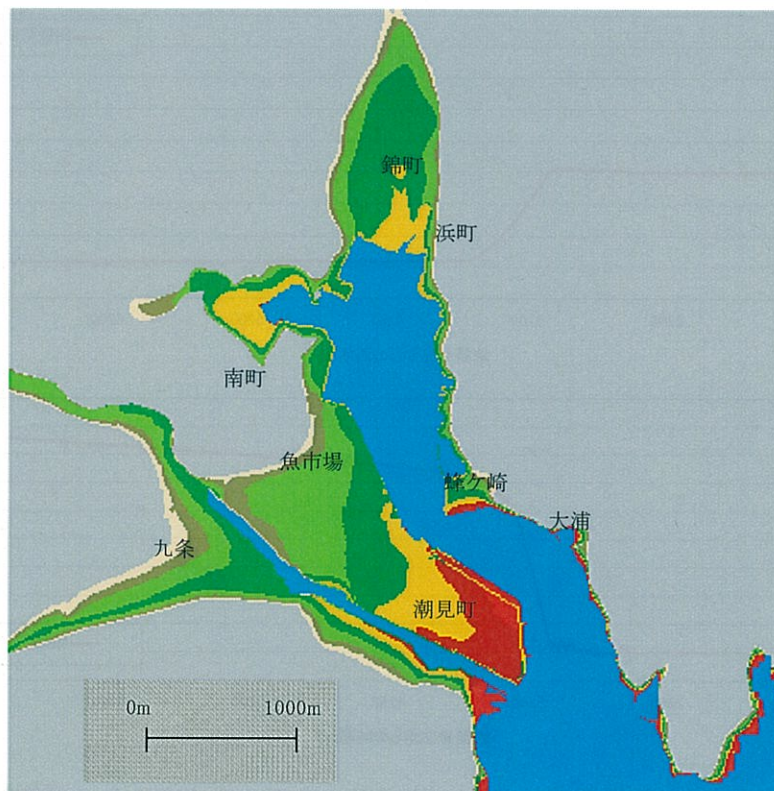


図-6.13 最大浸水領域および最大浸水高（防波堤無，L2 地震津波）



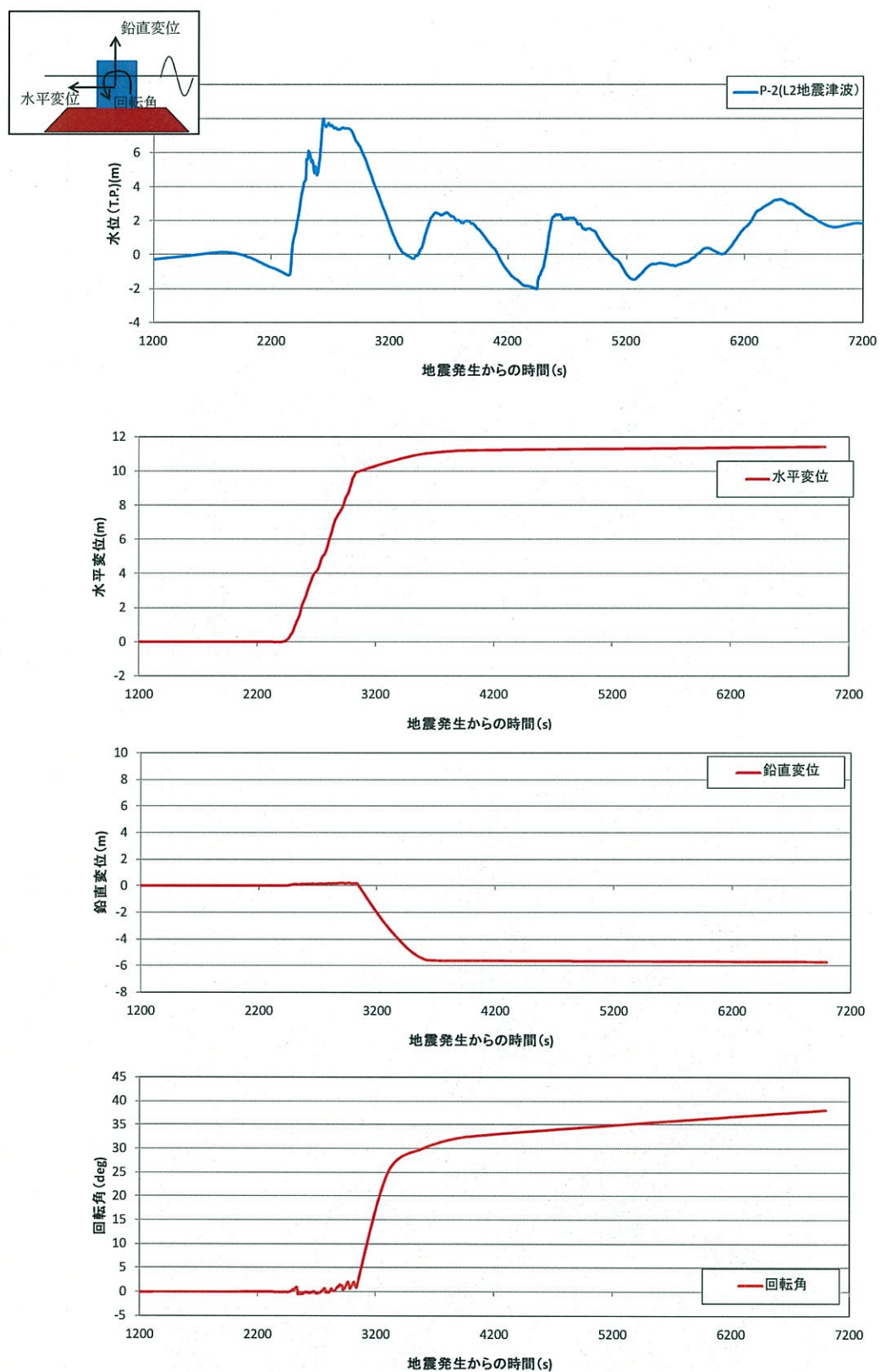


図-6.14 L2 地震津波に対する防波堤の水平・鉛直変位および回転角  
(第5章における解析結果)

上記の議論では津波防波堤の破壊を考慮したが、L2 地震津波に対して防波堤が破壊されないと仮定した場合の浸水解析も合わせて行った。図-6.15(1)に最大浸水領域および最大浸水高を示す。合わせて図-6.15(2)に防波堤の破壊を考慮した結果も示す。防波堤の破壊の有無により気仙沼大川北部地点に発生する津波浸水領域、高さに大きな違いが生じている。また、防波堤の破壊を考慮した場合は、潮見町先端部からの直接的な津波浸水が発生しているものの、考慮しない場合では浸水が発生しておらず、潮見町から魚市場付近での浸水領域の違いが明確になっている。一方、錦町や南町での浸水領域や高さについては津波防波堤の破壊の考慮の有無であまり差が生じていない。

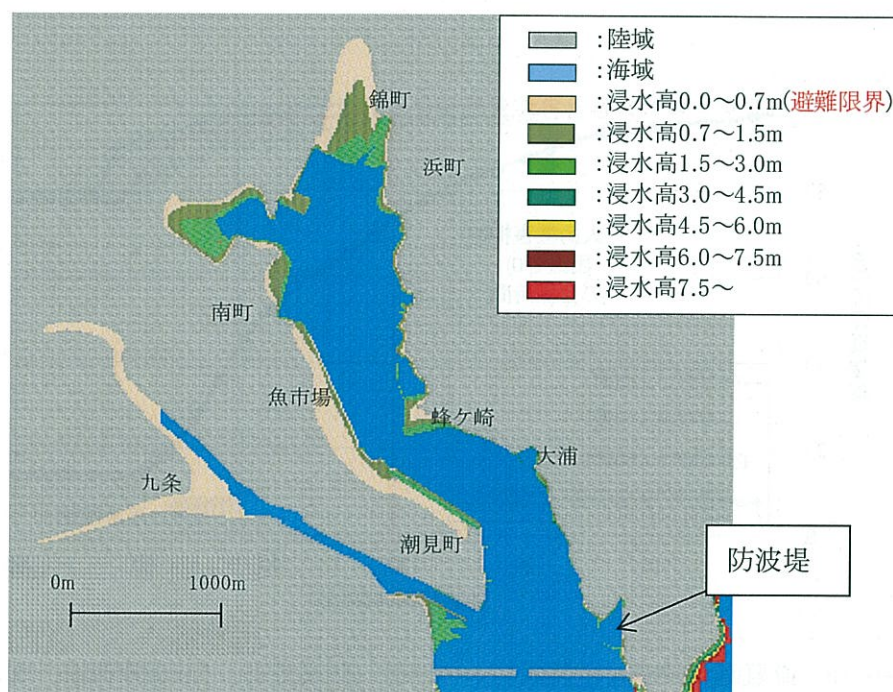


図-6.15(1) 最大浸水領域および最大浸水高（防波堤有，L2 地震津波）  
（防波堤は全く破壊しないと仮定）

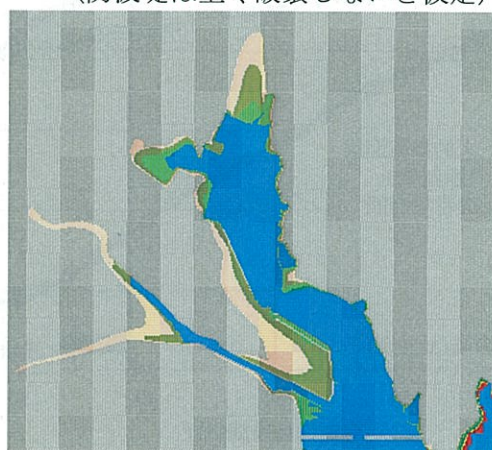


図-6.15(2) 最大浸水領域および最大浸水高（防波堤有，L2 地震津波）  
（防波堤の破壊を考慮）



次に、防波堤を設置した場合の L2 地震津波に対する避難行動解析により人的被害の評価を行う。図-6.16 および 図-6.17 に避難行動解析結果を示す。なお、図には防波堤を設置していないケース（ありのままの姿）の検討結果も合わせてプロットしている。防波堤のない場合よりも全体的な避難成功率は飛躍的に向上する傾向を示しているものの、徒歩避難の場合は、60 歳以上のケースで 12 分後以降、車両避難 1000 台のケースでは、依然として地震発生直後に避難を開始しても避難成功率が 100%には到達しない結果を示している。防波堤の配置のみでは、30 分以内に避難を開始すれば人的被害を抑制できるというあるべき姿を満足するには至っていないことが明確にわかる。

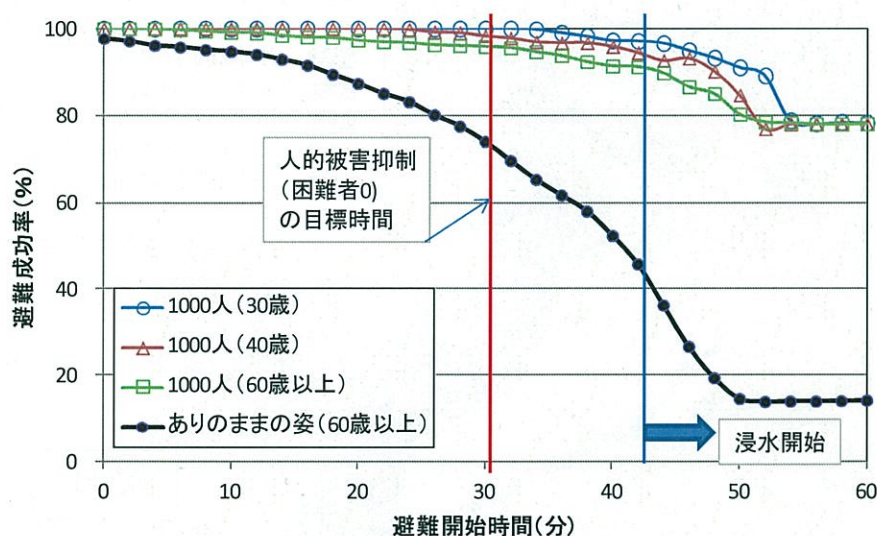


図-6.16 避難開始時間と避難成功率の関係（防波堤有，L2 地震津波，徒歩避難）

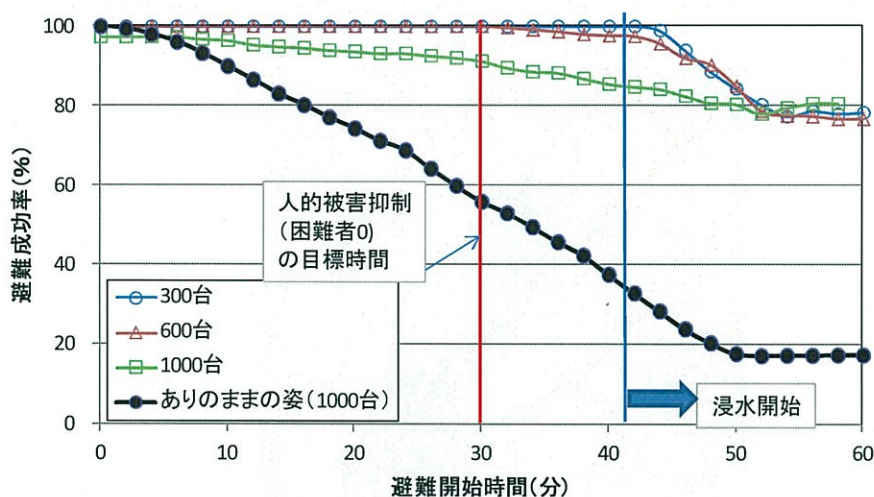


図-6.17 避難開始時間と避難成功率の関係（防波堤有，L2 地震津波，車両避難）



図-6.18 に避難開始時間 30 分後、60 歳以上のケースにおける避難者の初期位置および避難時間コンターを示す。高台の所定の避難場所までの所要時間は、最大で 50 分程度となっており、特に潮見町先端部付近の人が比較的避難困難となる可能性が高い傾向を示している。また、浜町付近に初期位置とする避難者においても避難困難となる危険性が比較的高いと考えられる。一方、図-6.19 に示す車両避難の場合の避難者の初期位置および避難時間コンターからは、車両避難のケースにおいても概ね同等の傾向を示しているものの、避難時間コンターの分布については車両渋滞によりやや複雑化している。渋滞に巻き込まれるか否かで、所要時間が大きく異なることを示唆している。



図-6.18 避難困難者の初期位置と避難時間コンター（防波堤有，L2 地震津波）  
（60 歳以上，避難開始 30 分，避難成功率 96%）



図-6.19 避難困難者の初期位置と避難時間コンター（防波堤有，L2 地震津波）  
（1000 台，避難開始 30 分，避難成功率 91%）



図-6.20 に車両避難の場合の道路使用頻度を 図-6.21 に津波来襲直前の車両走行状況を示す。初期位置を潮見町先端に位置する避難者は、魚市場前面（A 区域）で発生する渋滞の影響により、避難困難となりやすい傾向を示している。また、避難所に通じる別経路の気仙沼中央（B 区域）でも同様の車両停滞が生じており、その結果避難困難となりやすい地形特性にあるものと考えられる。



図-6.20 車両避難における道路の使用頻度（防波堤有，L2 地震津波）  
（1000 台，避難開始 30 分，避難成功率 91%）



図-6.21 地震発生から 42 分後の車両走行状況（防波堤有，L2 地震津波）  
（1000 台，避難開始 30 分，避難成功率 91%）

## 6.2.5 避難所増設による減災効果の評価

6.2.3 節での検討からでは，L1 地震津波に対しては，やるべきこととして沖合に防波堤を設置することによってあるべき姿を満足する結果が導かれた．しかし，L2 地震津波に対しては，防波堤の破堤や天端を津波が越えることなどにより，背後施設の防護が不完全であり，人的被害を抑制するというあるべき姿を満足できない結果となる．

そこで本節では，L2 地震津波に対するあるべき姿を満足する方策の1つとして，沖合の防波堤設置に加えて，避難所を新たに増設する，やるべきことを提案して，それによる人的被害の抑制が可能かどうかについての検討を行う．

増設する避難所は，避難時間コンターと避難困難者の初期位置の分布を参考に，また浸水領域から外れた地点に 図-6.22 に示す南町，浜町での人的被害抑制のための1地点，および潮見町から魚市場にかけての1帯をカバーするための2か所を増設候補として提案する．

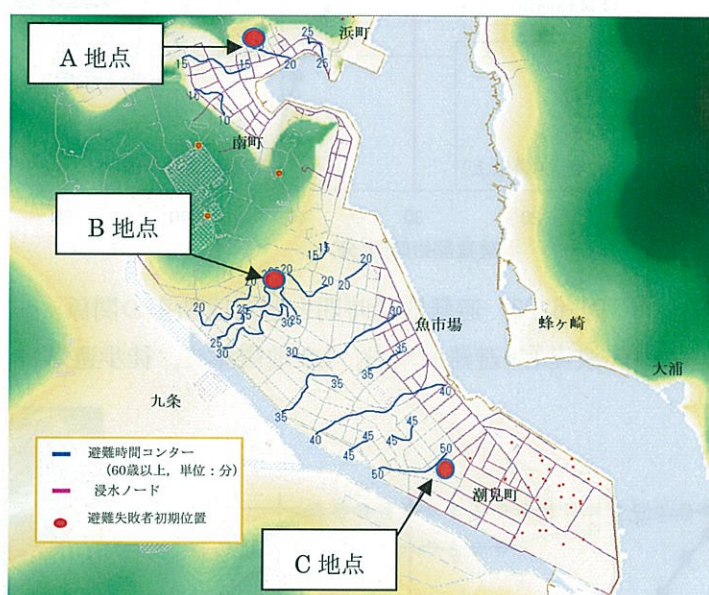


図-6.22 避難困難者の初期位置と避難時間コンター（防波堤有，L2 地震津波）

表-6.4 に避難行動解析の実施ケースを示す．なお，実際には避難所の規模により避難可能な人数（台数）について議論が必要となるが，本研究では収容制限等については考慮していない．

表-6.4 避難所増設計画

ケース名	避難所
ケース1	A 地点および B 地点
ケース2	A 地点および C 地点
ケース3	A, B, C 地点



図-6.23 および 図-6.24 に避難所を増設したケースについて避難行動解析を実施した結果を示す。なお、本検討では最も避難成功率の低い、徒歩による避難では60歳以上、車両避難は1000台のケースについて行うこととしている。徒歩による避難では、全てのケースにおいて30分以内に避難を開始すれば、避難成功率100%である。また、車両避難においては、避難所A+B+Cのケースで30分以内の避難開始時に避難困難者0となっている。よって、A、B、C地点に避難所を新たに配置することで、避難方法によらずあるべき姿を満足できると考えられる。

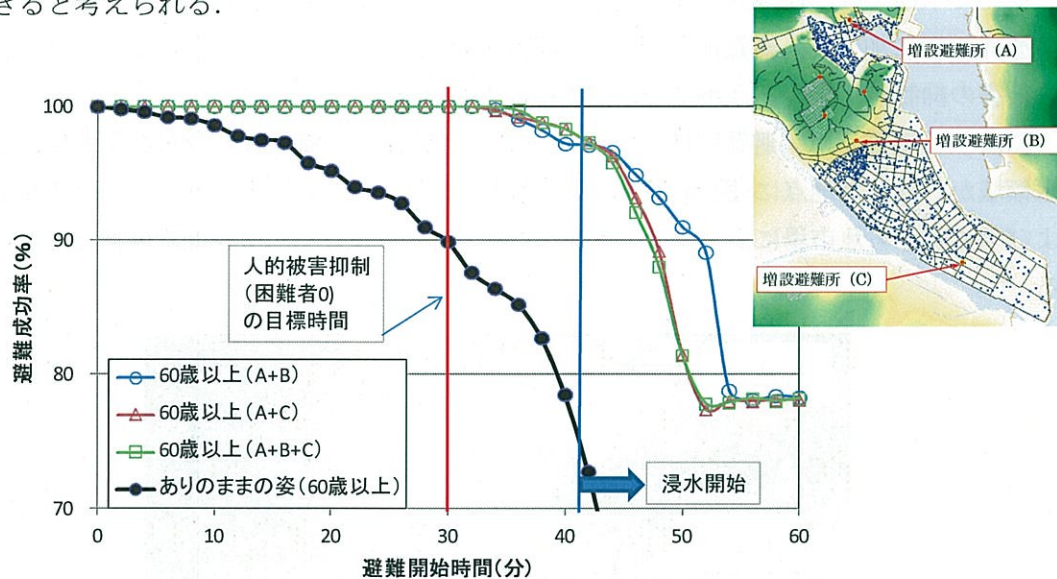


図-6.23 避難開始時間と避難成功率の関係  
(防波堤有+避難所増設, L2 地震津波, 徒歩避難)

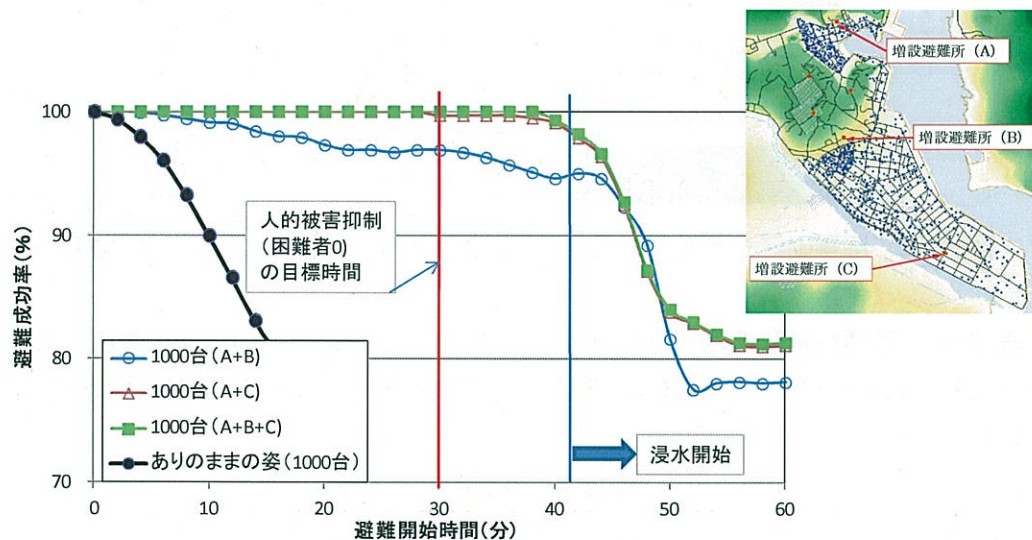


図-6.24 避難困難者の初期位置と避難時間コンター  
(防波堤有+避難所増設, L2 地震津波, 車両避難)



図-6.25 および 図-6.26 に解析結果の避難時間コンターを示す。徒歩避難においては、避難所の増設により浜町が、南町近辺の初期位置者は、避難所を増設しない場合より避難に係る時間が 10 分程度短縮化しており、潮見町付近の避難者では、20～30 分程度まで短縮している。車両避難の場合においても、ほぼ同様の傾向を示しており、避難所増設による避難成功率の向上効果が明確に表れている。



図-6.25 避難困難者の初期位置と避難時間コンター  
(防波堤有+避難所増設 A+B+C, L2 地震津波, 車両避難)  
(60 歳以上, 避難開始 30 分, 避難成功率 100%)



図-6.26 避難困難者の初期位置と避難時間コンター  
(防波堤有+避難所増設 A+B+C, L2 地震津波, 車両避難)  
(1000 台, 避難開始 30 分, 避難成功率 100%)



図-6.27 に解析結果のうち、車両避難における道路の使用頻度を示す。避難所を増設しないケースにおいては、潮見町から魚市場にかけての道路において使用頻度が極端に増加していた傾向が大きく緩和されている。また、浜町から南町にかけても同様に、避難所の増設による渋滞緩和が得られている傾向が示されている。以上の点から、避難所の増設により交通渋滞の緩和が図られて、その結果避難成功率の大幅な向上効果が得られているものと推測される。



図-6.27 車両避難における道路の使用頻度  
(防波堤有+避難所増設 A+B+C, L2 地震津波, 車両避難)  
(1000 台, 避難開始 30 分, 避難成功率 100%)

以上から、L2 地震津波に対しては、沖合の防波堤の配置と避難所の適切な増設計画の双方のやるべきことにより、あるべき姿を満足することが得られる。表-6.5 に本章の検討にて得られた減災達成のための結論をまとめた表を示す。

表-6.5 検討結果一覧

地震 津波	ありのままの姿		あるべき姿	やるべきこと（本研究）
	浸水被害	人的被害		
L1	発生する (浸水高 3m)	2～4 分以降に避難開始 すると被害が発生する	浸水被害を 抑止する	津波防波堤の配置 により達成
L2	発生する (浸水高 8m)	地震直後に避難開始し ても被害が発生する	人的被害を 抑止する	津波防波堤+避難所の増 設（3 箇所）により達成

### 6.3 結論

本章では、まず今後の津波被害軽減を果たすために、減災の概念を導入することの重要性について概説し、それを実現する上では、あるべき姿、今ある姿、およびやるべきことの関連性について明らかにすることが最も効果的である旨について提案した。次いで、それらの関連性を定量的に明らかにするために、本研究において構築した各解析を総合的に活用することが極めて有効である点について議論した。津波災害減災に関する既往の研究では、防災構造物の破壊による影響までを考慮されていない浸水被害の評価であったり、移動手段の違いが考慮されていない人的被害の評価であったりなど、被害評価における各要素の課題が多い状況であった。本研究では、各被害評価要素を高度化することにより、総合的に見て、より現実性の高い被害評価手法の構築を行った。そして、それらを用いて気仙沼市大川地点を対象として、あるべき姿および対策方法（やるべきこと）を提案しての検討を実施した。

気仙沼市大川地点を対象として津波災害評価を行った結果、L1 地震津波に対しては、沖合の防波堤の設置により浸水被害の発生を防ぐという、あるべき姿を満足でき、L2 地震津波に対しては、防波堤の大規模破壊の発生により直接的な浸水被害を免れることは困難となるものの、さらに避難所を 3 か所新たに増設することで人的被害を抑制するという目的を果たすことが可能である結果を得た。

津波減災を進める上では、まず多岐にわたる津波被害の予測を総合的に行って現在の姿（ありのままの姿）を詳細に認識しなければならない。現在の姿を把握することで、具体的な対策方法（やるべきこと）を講じることが可能であり、その対策による効果は定量的に把握する必要がある。そして、目標とする減災レベル（あるべき姿）との乖離を縮めていく必要がある。すなわち、ありのままの姿、やるべきこと、あるべき姿の関係を把握し、随時更新していくことである。本研究にて構築した総合技術を用いることで、3つの関係を詳細に把握することが可能であり、地震津波災害に対する減災を果たす上で極めて有効な手法であると考えられる。



## 参考文献

- [1] 内閣府 防災情報のページ <http://www.bousai.go.jp/index.html>
- [2] 永松伸吾：減災政策論入門【巨大災害リスクと市場経済】，シリーズ災害と社会④，弘文堂，218p., 2008 年 11 月.
- [3] 人と防災未来センター，<http://www.dri.ne.jp/center/gensai.html>
- [4] 河田恵昭：大規模地震災害による人的被害の予測，自然災害科学, Vol.16, No.1, pp.3-13, 1997.
- [5] 土木学会：津波推計・減災検討委員会報告書，115p., 平成 24 年 6 月.
- [6] 公益法人土木学会東日本大震災特別委員会地域防災計画特定テーマ委員会：中間とりまとめ（案），120p., 2011 年 12 月.
- [7] 村上ひとみ，柳原純夫，三上卓：石巻市の津波避難における車利用のパターンと危険性, 5p., SATREPS Tsunami Study WG4a Meeting at Univ. Conception, Apr. 16, 2013.

## 第7章 結論

本論文では、津波による被害予測として、津波浸水被害、船舶漂流被害、人的被害および港湾施設（防波堤）の大規模変形被害に関する各予測解析手法の構築を行い、その妥当性を検証するとともに、気仙沼大川北部地点を対象にした検討を通じて、構築した個別の手法を総合的に用いることにより津波減災評価に資することが可能であることを示した。本研究により得られた知見を、以下に結論としてまとめる。

### 第2章 津波による浸水被害の評価

- (1) 津波の伝播解析においては、線形・非線形長波理論に基づく手法を用いた。断層モデルに対してはアスペリティを考慮しないパターンを考え、Mansinha & Smylie の手法に従って静的に海底地盤変位を計算し、これを初期水位として与える方法とした。陸上地形の効果については、底面粗度を設定することで評価し、領域接続法によって対象地点の津波水位、遡上高を求める手法とした。この津波の伝播モデルを用いて東北太平洋沖地震津波の再現計算を行い、気仙沼大川北部地点の浸水・遡上高について現地調査結果と両者は一致することを確認して、モデルの妥当性の検証を行った。
- (2) 津波レベル毎の気仙沼大川北部地点における津波伝播特性については、第1波目（水位変動が発生）の来襲は地震津波レベルの違いによる明確な差は見られず、地震津波 L1, L2 地震津波ともに地震発生から約 40 分後であった。地震津波レベルの違いによる浸水エリアの相違は大きく、L2 地震津波による浸水エリアは L1 地震津波に比べて約 1.5 ～ 1.7 倍、最大浸水高では約 2.0 ～ 2.5 倍もの差が生じた。

### 第3章 船舶漂流による被害の評価

- (1) 津波被害予測における船舶の漂流による流出・衝突被害の評価手法を新たに構築した。解析手法は既往の DEM 法をベースに以下の付加要素を加えて適用性向上を図った。あらかじめ解析した津波水位・流速を外力条件とした。障害物との接触は個別要素法に基づき、船舶などの漂流物は複数の球要素からなる複合体としてモデル化を行った。抗力実験結果に基づいた津波の流向による抗力変化をモデルに組み込むことで船舶の漂流特性を考慮できるようにした。さらに、正規分布関数に基づく拡散項を導入した津波流体力の不確定性を確率的に評価した。



この船舶漂流予測モデルを用いて、水理模型実験結果の再現計算を行い、段波津波に対してコンテナや自動車、および船舶の漂流軌跡や座礁位置において両者が一致することを確認してモデルの妥当性を確かめた。

- (2) 気仙沼大川北部地点を対象とした船舶漂流挙動の予測計算を行った結果、L1 地震津波に対しては流出被害が発生する傾向が強く、一方で L2 地震津波では流入被害が顕著であった。また、構造物への衝突の発生やその衝突応力の最大値は、水際付近の位置で大きくなる結果を示すことがわかった。

#### 第 4 章 人的被害の評価

- (1) 津波被害予測における人的被害の予測を行う評価手法を新たに構築した。解析モデルは、リンク・ノードモデルに基づく手法をベースに、あらかじめ計算した津波浸水解析の結果に対する避難成功率を算出することで人的被害の予測を行い、津波に対する避難限界の設定（避難不可の判定）として、既往の水理模型実験結果に基づいた現実的な設定値を考慮した。また、従来の歩行避難に加え、車両渋滞を考慮した車による避難モデルを付加させたモデルを新たに付加した。このモデルの妥当性を、東日本大震災発生後の気仙沼大川北部地点の渋滞発生位置についての調査結果と一致することにより確かめた。
- (2) 気仙沼大川北部地点を対象とした人的被害の予測計算では、浸水開始は地震発生から 40～45 分後程度であり、津波レベルの違いによる差は殆ど生じていなかった。徒歩避難の場合、L1 地震津波に対しては、60 歳以上のケースで地震発生から 10 分後の避難開始を始めた場合から被害が生じ始める傾向にあった。津波浸水開始後における避難成功の可否は初期位置への依存度が極めて高くなるため、45 分後以降に避難開始した場合の被害率は殆ど変化しなかった。L1 地震津波のケースにおいてはあまり年齢の違いによる影響が見られず、避難開始時間による避難成功率に与える影響が顕著であった。一方、L1 地震津波のケースにおいては、避難開始時間の遅れに伴う避難成功率の低下が際立っており、避難開始時間が 20 分後の場合で、避難困難者の割合が L1 地震津波のケースの約 2 倍まで増加する結果を示した。

車両による避難行動の場合、L1 地震津波のケースにおいては、走行車両の増加に伴い、避難開始時間の違いによる避難成功率への影響が顕著に表れた。車両台数が 700 台程度までの範囲では、徒歩避難よりも高い避難成功率であった。しかし、1000 台の場合においては被害が発生する（成功率 100%以下）開始時間が大幅に早くなり、また、被害が発生する開始時間は徒歩による避難のケースよりも短くなった。走行車両が 1000 台程度まで増加すると、避難手段としては、自動車よりも徒歩の方が有効であった。L2 地震津波の 1000 台のケースにおいては、特に交差点での渋滞がボトルネックになり、その結果、例え地震発生から早急に避難を開始したとしても、人的被害の発生を

防ぐことが困難であることが明確となった。

## 第5章 津波防波堤の倒壊被害評価

- (1) 津波防波堤の大変形破壊を再現する解析手法を新たに構築した。解析モデルはマウンド要素を楕円モデルによる DEM (distinct elemental methods) 法により再現し、捨石同士の噛み合わせ効果の評価を向上させた手法をベースに、ケーソンは剛体の集合体とし、波力による外力は波圧分布を別途境界要素に個別に作用させるモデル、剛体ケーソンの運動方程式に水の粘性を反映した変動型の付加質量力を新たに導入し、粒子間速度の増加に伴ってスライダーが線形的に変化するモデルを用い、上限値を捨石の安息角から算出した粒子間摩擦角に対し 0.85 倍まで低下させる（不連続摩擦モデル）手法を付加させた。この予測モデルを用いて、ケーソン式防波堤の大変形破壊を生じさせる水理模型実験結果の再現計算を行い、偶発波浪によるケーソンの変位・傾斜角、地盤反力、捨石マウンドの崩壊状況などについて両者が一致することを確認し、モデルの妥当性を確かめた。
- (2) 気仙沼大川北部地点沖合に仮想の津波防波堤を配置する計画を想定し、概略設計により防波堤の規格を決定後、L1 地震津波および L2 地震津波に対する防波堤の変形量の予測解析を行った。その結果、L1 地震津波では、滑動量 3mm 程度の微量の変位のみの発生に対し、L2 地震津波では第一波目の押し波時に 40° 程度の回転を伴うケーソンの大規模変位が生じることとなった。

## 第6章 地震津波に対する減災の評価

- (1) 津波被害の減災を果たす上では、「あるべき姿 - ありのままの姿 = やるべきこと」の関係を評価することの重要性を指摘し、多岐にわたる被害が特徴である津波災害に対して、第2章から第5章までに構築した各解析手法を活用することが有効であることを示した。
- (2) 気仙沼大川北部地点を対象に模擬的な検討を行い、本研究において構築した技術を活用することで、有効に減災評価が行えることを示した。気仙沼大川北部地点におけるあるべき姿を仮想的に設定し、L1 地震津波に対しては沖合の津波防波堤の構築（やるべきこと）により、浸水を抑制することが可能であることが得られた。L2 地震津波において人的被害を抑制するあるべき姿については、津波により防波堤が破壊に至るため、避難行動解析の結果から、やるべきことが欠如していることを確認した。L2 地震津波に対しては、さらに、浸水領域外に避難所を3か所増設することで、あるべき姿を満足可能となるという結果が得られ、第2章から第5章までに構築した各解析手法を活用する



ことにより、津波被害の定量的な減災効果の評価が可能であることを確認した。

上記のように、本研究で構築した個別の手法を総合的に用いることにより、L1 および L2 地震津波に対する津波減災評価を定量的に評価することが可能となった。一方で、以下の課題については今後の進展が必要である。

浸水解析手法については高精度化、避難行動解析については避難モデルの充実化により避難の実態をさらに反映させる、漂流物の挙動解析手法では被害の整理方法や被害の定義などについてより研究を深めることが重要である。港湾構造物の破壊解析においては、現状ではマウンド・ケーソンの崩壊現象の再現性に特化した研究に留まっており、今後は外力の評価（例えば、越流による背後マウンドの飛散、マウンド内の透過波によるマウンドへの浸透流）についてもより拡充していく必要がある。この分野についてはまだ研究の蓄積が少なく、今後も研究を進めていく必要がある。

なお、2014 年 3 月時点において、気仙沼大川北部地点では、現在震災からの復興計画について様々な検討が誠意行われている最中であり、第 6 章における結論として述べたやるべきことと、実際の復興計画の全てが一致しているとは限らない点にはご容赦願いたい。

## 謝 辞

本論文を取り纏めるにあたり、京都大学防災研究所 間瀬 肇 教授には海岸工学の基礎から全般に渡り、幅広くご指導とご鞭撻を賜りました。さらに、研究に対する姿勢や研究・開発に関する多くの見識についても貴重な時間を割いてご教示頂きました。ここに心から深甚なる感謝の意を表するとともに深くお礼申し上げます。

京都大学防災研究所 森 信人 准教授には、貴重なご意見ならびにご指導頂きました。ここに深くお礼申し上げます。また、京都大学防災研究所 安田誠宏 助教には、あたたかく研究室に迎え入れて頂き、ご支援頂きました。深く感謝の意を表します。東北大学 今村文彦 教授には、気仙沼市共同研究において多くのご助言を頂きました。ここに深くお礼申しあげます。国土総合技術政策研究所 宮田正史 室長には、多くのご指導を頂きました。大変ありがとうございます。

五洋建設株式会社 関本恒浩 技術研究所長には、博士後期課程への入学を快く承諾していただき、厚く御礼申し上げます。また、森屋陽一 部長には、公私ともにたくさんのご助言を頂きました。技術研究所 海岸海洋チームリーダー片山裕之 部長には多くのアドバイスをいただきました。厚くお礼申しあげます。また、西畑 剛 課長にはたくさんの助言をいただきました。また海岸チーム同僚の皆様には、本研究の遂行に際し多くのご協力を頂きました。厚く御礼申し上げます。

最後に精神的に大きな支えとなってくれた最愛の妻、環、そして昌雄、倫恵には心から感謝します。



